

# FISICA MODERNA

CdLM Ingegneria Energetica - sede di Bologna

CdLM Ingegneria dell'Energia Elettrica - sede di Bologna

## 06 – Elementi di Fisica Nucleare

Prof. Mauro Villa

Anno Accademico 2016/2017



*Gilio Cambi (Associato di Ricerca Senior INFN)*

# L'atomo e il nucleo

La **fisica atomica** era nata con la scoperta dell'elettrone (J.J.Thomson 1897). A distanza di poco più di 30 anni, con la scoperta del neutrone (Chadwick 1932) nasce la **fisica nucleare**.

Alla fine del XIX secolo non era netta la distinzione tra atomo e nucleo.

Vengono proposti vari modelli per descrivere l'atomo: tra essi il **modello di Thomson** ed il **modello di Rutherford**.

Nasce poi la concezione dell'atomo costituito da una nuvola di elettroni distribuita in una zona di dimensioni  $10^{-8}$  cm e da un nucleo centrale costituito da protoni e neutroni con dimensioni di  $10^{-13}$  cm.

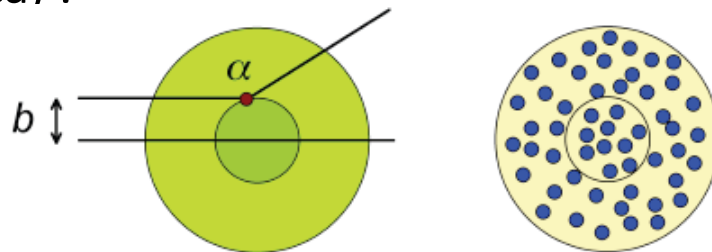
Una dettagliata teoria dell'atomo e del nucleo è usata per la prima volta da Heisenberg nel 1932.

# Modello dell'atomo di Thomson

Nel **modello di Thomson** gli atomi venivano descritti come distribuzioni sferiche di carica positiva, delle dimensioni di  $10^{-8}$  cm, all'interno delle quali erano sistemati gli elettroni in numero tale da garantire una carica complessivamente nulla all'atomo.

La carica positiva è distribuita in maniera uniforme (all'interno del nucleo o atomo), così come gli elettroni. La carica di una sfera di raggio  $b$  è *quindi in media nulla e non dipende da  $b$* .

Secondo tale modello, particelle  $\alpha$  (cariche positivamente) lanciate contro un dato materiale interagiscono con una sfera essenzialmente neutra e non possono quindi subire deflessioni a grandi angoli (teorema di Gauss dell'elettrostatica) .

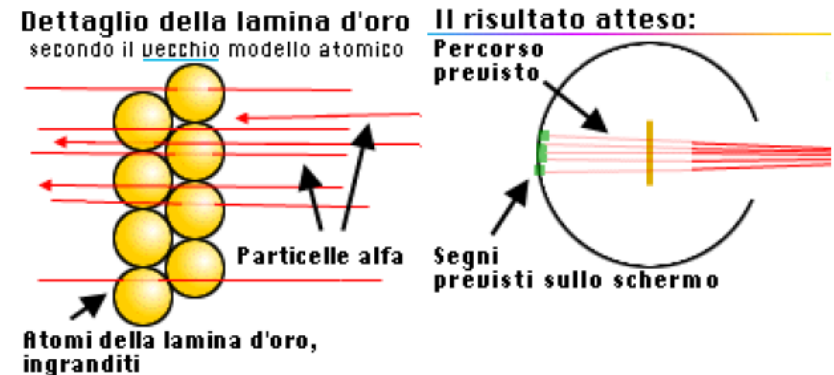


**Il modello tuttavia non rendeva conto dei risultati dell'esperimento di diffusione delle particelle  $\alpha$  su atomi pesanti (un sottile foglio di oro dello spessore di  $5 \cdot 10^{-4}$  mm) effettuato da Rutherford.**

# Esperimento di Rutherford

Lo scopo dell'**esperimento** era di trovare prove a favore della teoria secondo cui gli atomi sono sfere permeabili neutre. Ci si aspettava che le particelle alfa, dotate di alta energia, non avessero problemi a sfrecciare attraversando qualche atomo. Le particelle alfa avrebbero dovuto semplicemente passare dritte attraverso la lamina d'oro e lasciare delle tracce in una piccola regione dello schermo posto dietro la lamina.

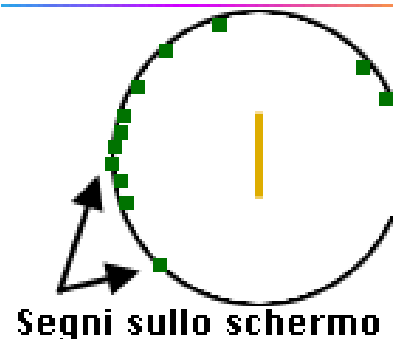
## Risultati attesi



## Risultati ottenuti

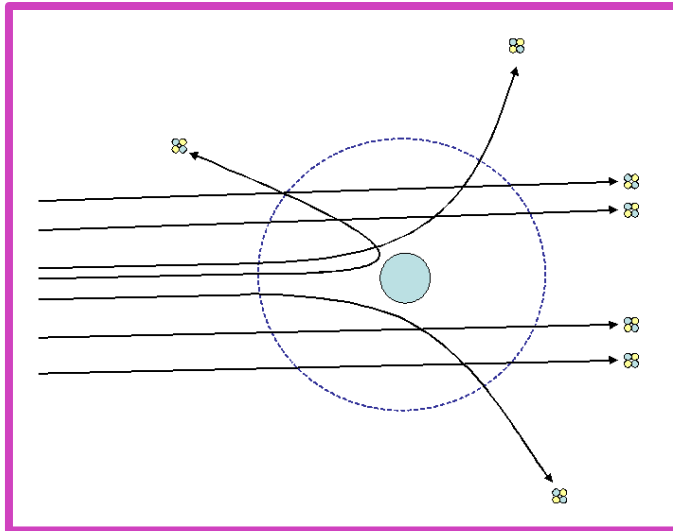
In realtà, lo schermo mostrava tracce nella parte dietro la lamina, ma, con grande sorpresa di tutti, ne mostrava alcune anche nella parte di fronte alla lamina.

## Il risultato



# Modello dell'atomo di Rutherford

Sperimentalmente si trovò quindi che alcune particelle  $\alpha$  erano deflesse ad angoli **anche maggiori di  $90^\circ$** .



*E' come se una palla di cannone sparata contro un foglio di carta velina tornasse indietro  
(commento di Rutherford ai risultati del suo esperimento)*

Rutherford quindi immaginò che l'atomo fosse composto da **un nucleo centrale** con carica positiva  $+Ze$  delle dimensioni di  $R_N \approx 10^{-12}$  cm; gli **Z elettroni erano sistemati attorno al nucleo** ad una distanza dell'ordine del raggio atomico  $R_a \approx 10^{-8}$  cm.

# Il Nucleo Atomico

**Il nucleo è costituito da nucleoni (protoni p e neutroni n)**

**I protoni sono particelle con carica + e i neutroni sono neutri**

**Il nucleo è caratterizzato da diversi parametri di cui i più importanti sono:**  
**il numero di massa A**, che rappresenta il numero totale di nucleoni nel nucleo,  
**il numero atomico Z** che è il numero di protoni  
**il numero di neutroni N**

Si ha  $A = Z + N$ .

**Altri parametri importanti del nucleo sono:**  
**lo spin totale, la parità e l'emivita.**

## Massa atomica e nucleare

Nel nucleo è concentrata quasi tutta la massa dell'atomo. Infatti, neutroni e protoni hanno masse molto più grandi (circa 1800 volte) di quella degli elettroni. La massa del protone è quasi uguale a quella del neutrone

Se si trascura la piccolissima differenza esistente tra le masse del protone e del neutrone, si può concludere che la massa di un nucleo vale  $Z + N$  volte la massa del protone. La quantità  $Z + N$  s'indica con la lettera  $A$  e si chiama numero di massa.

Come termine di paragone per le masse atomiche (e nucleari) si è scelto un particolare isotopo del carbonio molto abbondante in natura: il carbonio-12. Nel suo nucleo sono presenti 6 protoni e 6 neutroni; il suo numero di massa  $A$  vale dunque 12.

Come unità di misura delle masse atomiche (u.m.a.) si è scelta la dodicesima parte della massa del carbonio-12.

$$1 \text{ u.m.a. (anche indicata con u)} = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$\text{Dalla } E=mc^2 \text{ si ottiene anche } 1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$$

## Un po' di terminologia nucleare

Tutti gli atomi che hanno **uguale  $Z$** , anche se differiscono per il numero di neutroni, danno origine allo **stesso elemento chimico**, hanno in pratica le medesime proprietà e occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi. Per questo motivo atomi con lo stesso numero atomico  $Z$  sono detti **isotopi** (*perché occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi*).

*Ad esempio: l'elemento chimico idrogeno  $H$  ha tre isotopi:*

*$H$ -1, indicato anche come  $^1H$  (nucleo con un  $p$ )*

*$H$ -2, indicato anche come  $^2H$  (nucleo con un  $p$  e un  $n$ ) (chiamato Deuterio  $D$ )*

*$H$ -3, indicato anche come  $^3H$  (nucleo con un  $p$  e due  $n$ ) (chiamato Tritio  $T$ )*

I primi due sono isotopi **naturali** (cioè esistono in natura) e sono **stabili**.

Il terzo è **artificiale** (prodotto mediante reazioni nucleari) ed è **instabile** o **radioattivo**.

Nuclei con lo stesso valore di  $A$  e *diverso valore di  $Z$*  sono chiamati **isobari**.

Con il termine **nuclide** si indica una singola specie nucleare caratterizzata da un numero atomico  $Z$  e da un numero di massa  $A$ .

I **nuclidi** possono essere definiti come nuclei aventi lo stesso numero di neutroni e lo stesso numero di protoni; ciò li distingue dagli **isotopi**, che hanno invece fissato il solo numero di protoni, e quindi hanno un numero di neutroni variabile.



## Dimensioni atomiche e nucleari

Le prime dimensioni di nuclei sono stata determinate mediante esperimenti di deflessione di particelle  $\alpha$ , variando la velocità (energia cinetica) dei *proiettili*  $\alpha$  con cui venivano *bombardati* sottili fogli di oro e, successivamente, di altri elementi. (esperimenti simili all'esperimento di Rutherford).

Utili informazioni si ottengono anche utilizzando come *proiettili*, al posto delle  $\alpha$ , dei fasci di elettroni (con energia cinetica elevata,  $E_k > 200$  MeV per avere lunghezza d'onda di De Broglie minore delle dimensioni delle strutture nucleari da indagare).

Esperimenti condotti su vari elementi indicano che i nuclei, benché senza una ben definita superficie esterna, sono approssimativamente sferici (o, al più, ellissoidali). I raggi di tali nuclei (sfere) sono approssimativamente dati da :

**$R = R_0 A^{1/3}$**  dove  $R_0$  è una costante di valore  $1.2 \cdot 10^{-15}$  m (= 1.2 *fermi* o *femtometri*)  
Si ricorda che le dimensioni dell'atomo sono dell'ordine di  $10^{-10}$  m, cioè cinque ordini di grandezza più grandi.

Si ottiene anche  $V_{totale} = A \times \left( \frac{4}{3} \pi R_0^3 \right)$  cioè  $V_{totale}$  è proporzionale al numero di nucleoni.

Per la densità di un generico nucleo si ottiene  **$\rho \approx 10^{17}$  kg/m<sup>3</sup> !!!!**

# Ordinamento dei nuclei

I nuclidi stabili sono indicati con punti verdi

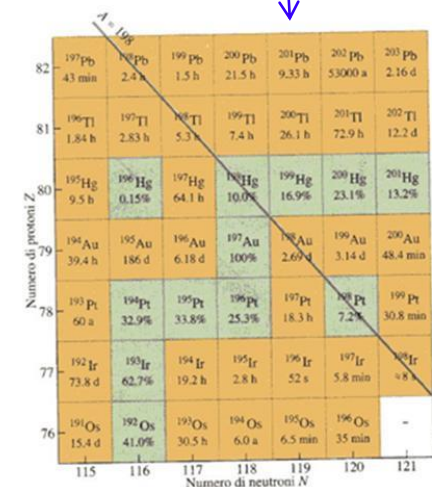
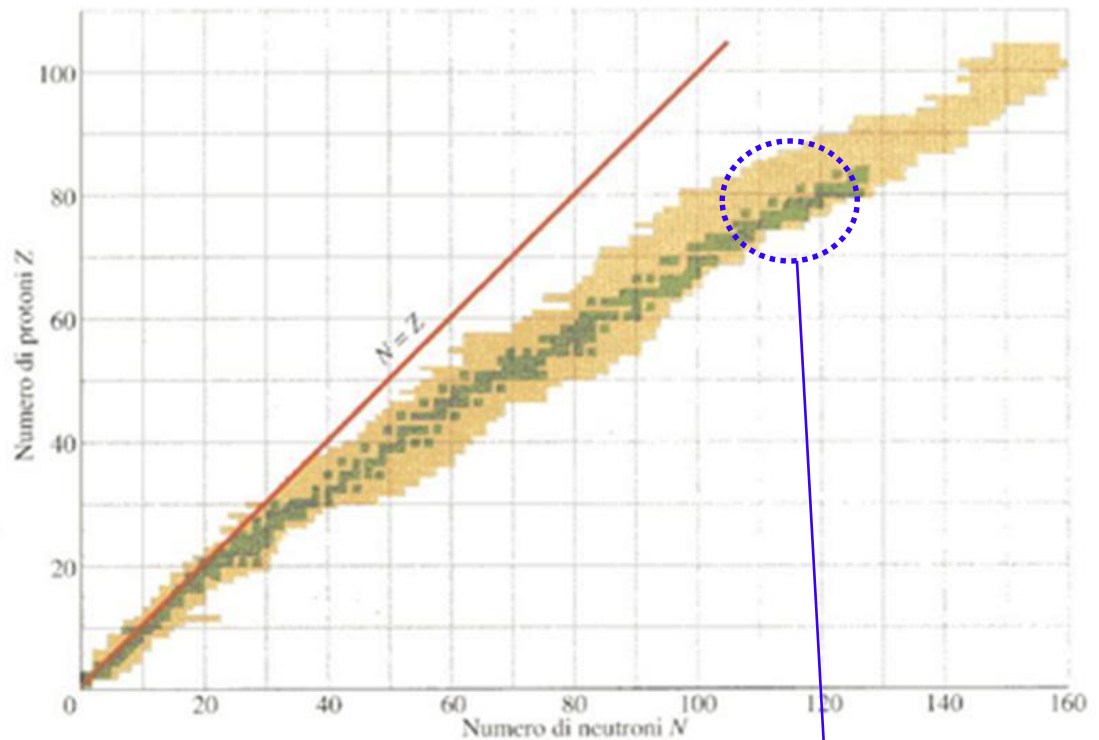
I nuclidi non stabili sono indicati con punti nocciola

I nuclidi stabili più leggeri sono disposti intorno alla retta  $N=Z$

I nuclidi più pesanti hanno sempre  $N > Z$

Non esistono nuclidi stabili con  $Z > 83$  (bismuto)

In ogni casella verde è riportata anche l'abbondanza isotopica relativa in natura, dell'isotopo stabile.  
In ogni casella nocciola è riportato anche il tempo di dimezzamento o emivita dell'isotopo radioattivo.



# TAVOLA PERIODICA DEGLI ELEMENTI

<http://www.periodni.com/it/>

GRUPPO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
PERIODO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	1 1.0079 <b>H</b> IDROGENO	2 4.0026 <b>He</b> ELIO																
2	3 6.941 <b>Li</b> LITIO	4 9.0122 <b>Be</b> BERILLIO																
3	11 22.990 <b>Na</b> SODIO	12 24.305 <b>Mg</b> MAGNESIO																
4	19 39.098 <b>K</b> POTASSIO	20 40.078 <b>Ca</b> CALCIO	21 44.956 <b>Sc</b> SCANDIO	22 47.867 <b>Ti</b> TITANIO	23 50.942 <b>V</b> VANADIO	24 51.996 <b>Cr</b> CROMO	25 54.938 <b>Mn</b> MANGANESE	26 55.845 <b>Fe</b> FERRO	27 58.933 <b>Co</b> COBALTO	28 58.693 <b>Ni</b> NICHEL	29 63.546 <b>Cu</b> RAME	30 65.38 <b>Zn</b> ZINCO	31 69.723 <b>Ga</b> GALLIO	32 72.64 <b>Ge</b> GERMANIO	33 74.922 <b>As</b> ARSENICO	34 78.96 <b>Se</b> SELENIO	35 79.904 <b>Br</b> BROMO	36 83.798 <b>Kr</b> CRIPTO
5	37 85.468 <b>Rb</b> RUBIDIO	38 87.62 <b>Sr</b> STRONZIO	39 88.906 <b>Y</b> ITTRIO	40 91.224 <b>Zr</b> ZIRCONIO	41 92.906 <b>Nb</b> NIOBIO	42 95.96 <b>Mo</b> MOLIBDENO	43 (98) <b>Tc</b> TECNETO	44 101.07 <b>Ru</b> RUTENIO	45 102.91 <b>Rh</b> RODIO	46 106.42 <b>Pd</b> PALLADIO	47 107.87 <b>Ag</b> ARGENTO	48 112.41 <b>Cd</b> CADMIO	49 114.82 <b>In</b> INDIO	50 118.71 <b>Sn</b> STAGNO	51 121.76 <b>Sb</b> ANTIMONIO	52 127.60 <b>Te</b> TELLURIO	53 126.90 <b>I</b> IODIO	54 131.29 <b>Xe</b> XENO
6	55 132.91 <b>Cs</b> CESIO	56 137.33 <b>Ba</b> BARIO	57-71 <b>La-Lu</b> Lantanidi	72 178.49 <b>Hf</b> AFNIO	73 180.95 <b>Ta</b> TANTALIO	74 183.84 <b>W</b> WOLFRAMIO	75 186.21 <b>Re</b> RENIO	76 190.23 <b>Os</b> OSMIO	77 192.22 <b>Ir</b> IRIDIO	78 195.08 <b>Pt</b> PLATINO	79 196.97 <b>Au</b> ORO	80 200.59 <b>Hg</b> MERCURIO	81 204.38 <b>Tl</b> TALLIO	82 207.2 <b>Pb</b> PIOMBO	83 208.98 <b>Bi</b> BISMUTO	84 (209) <b>Po</b> POLONIO	85 (210) <b>At</b> ASTATO	86 (222) <b>Rn</b> RADON
7	87 (223) <b>Fr</b> FRANCIO	88 (226) <b>Ra</b> RADIO	89-103 <b>Ac-Lr</b> Attinidi	104 (267) <b>Rf</b> RUTHERFORDIO	105 (268) <b>Db</b> DUBNIO	106 (271) <b>Sg</b> SEABORGIO	107 (272) <b>Bh</b> BOHRIO	108 (277) <b>Hs</b> HASSIO	109 (276) <b>Mt</b> MEITNERIO	110 (281) <b>Ds</b> DARMSTADTIO	111 (280) <b>Rg</b> ROENTGENIO	112 (285) <b>Cn</b> COPERNICIO	113 (...) <b>Uut</b> UNUNTRO	114 (287) <b>Fl</b> FLEROVIO	115 (...) <b>Uup</b> UNUNPENTIO	116 (291) <b>Lv</b> LIVERMORIO	117 (...) <b>Uus</b> UNUNSEPTIO	118 (...) <b>Uuo</b> UNUNOCTIO

## LANTANIDI

57 138.91 <b>La</b> LANTANIO	58 140.12 <b>Ce</b> CERIO	59 140.91 <b>Pr</b> PRASEODIMIO	60 144.24 <b>Nd</b> NEODIMIO	61 (145) <b>Pm</b> PROMETIO	62 150.36 <b>Sm</b> SAMARIO	63 151.96 <b>Eu</b> EUROPIO	64 157.25 <b>Gd</b> GADOLINIO	65 158.93 <b>Tb</b> TERBIO	66 162.50 <b>Dy</b> DISPROSIO	67 164.93 <b>Ho</b> OLMIO	68 167.26 <b>Er</b> ERBIO	69 168.93 <b>Tm</b> TULIO	70 173.05 <b>Yb</b> ITTERBIO	71 174.97 <b>Lu</b> LUTEZIO
------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	-------------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	---------------------------------	------------------------------------	-----------------------------------

## ATTINIDI

89 (227) <b>Ac</b> ATTINIO	90 232.04 <b>Th</b> TORIO	91 231.04 <b>Pa</b> PROTOATTINIO	92 238.03 <b>U</b> URANIO	93 (237) <b>Np</b> NETTUNIO	94 (244) <b>Pu</b> PLUTONIO	95 (243) <b>Am</b> AMERICIO	96 (247) <b>Cm</b> CURIO	97 (247) <b>Bk</b> BERKELIO	98 (251) <b>Cf</b> CALIFORNIO	99 (252) <b>Es</b> EINSTEINIO	100 (257) <b>Fm</b> FERMIO	101 (258) <b>Md</b> MENDELEVIO	102 (259) <b>No</b> NOBELIO	103 (262) <b>Lr</b> LAWRENTIO
----------------------------------	---------------------------------	--	---------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	-----------------------------------	--------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------	-------------------------------------	----------------------------------	--------------------------------------	-----------------------------------	-------------------------------------

(1) Pure Appl. Chem., 81, No. 11, 2131-2156 (2009)

Le masse atomiche relative sono espresse con cinque cifre significative. L'elemento non ha alcuni nuclidi stabili e un valore tra parentesi, e.g. [209], indica il numero totale dell'isotopo lungo-vivo dell'elemento. Tuttavia, tre elementi (Th, Pa ed U) hanno una composizione isotopica terrestre caratteristica e così loro massa atomica data.

Copyright © 2012 Eni Generali

## Energia di legame e difetto di massa






Prima di chiederci come sia possibile la stabilità dei nuclei (più particelle positive che si trovano a distanze molto piccole) osserviamo che, per qualunque nucleo con più nucleoni (cioè tutti, tranne  $^1\text{H}$ ):

*la massa  $M$  del nucleo è minore della somma  $\Sigma m$  delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti. Si ha allora un difetto di massa  $\Delta m = \Sigma m - M$ .*

Poiché massa  $\rightarrow$  energia secondo la relazione di Einstein, al difetto di massa  $\Delta m$  corrisponde una energia che è chiamata energia di legame (Binding Energy BE):

$$\Delta E = BE = \Sigma(mc^2) - Mc^2$$

*Esempio per una particella  $\alpha$*

		protons	2 x 1.00728 u		Alpha particle
		neutrons	2 x 1.00866 u		
Mass of parts			4.03188 u	Mass of alpha	4.00153 u

$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$

Non è un'energia che risiede nel nucleo, ma rappresenta l'energia che dovremmo spendere per dividere il nucleo in tutti i suoi nucleoni.

Altra grandezza molto importante è l'energia di legame per nucleone (energia media per separare un nucleone dal nucleo)

$$\Delta E_n = BE_n = \Delta E / A$$



## Energia di legame per nucleone

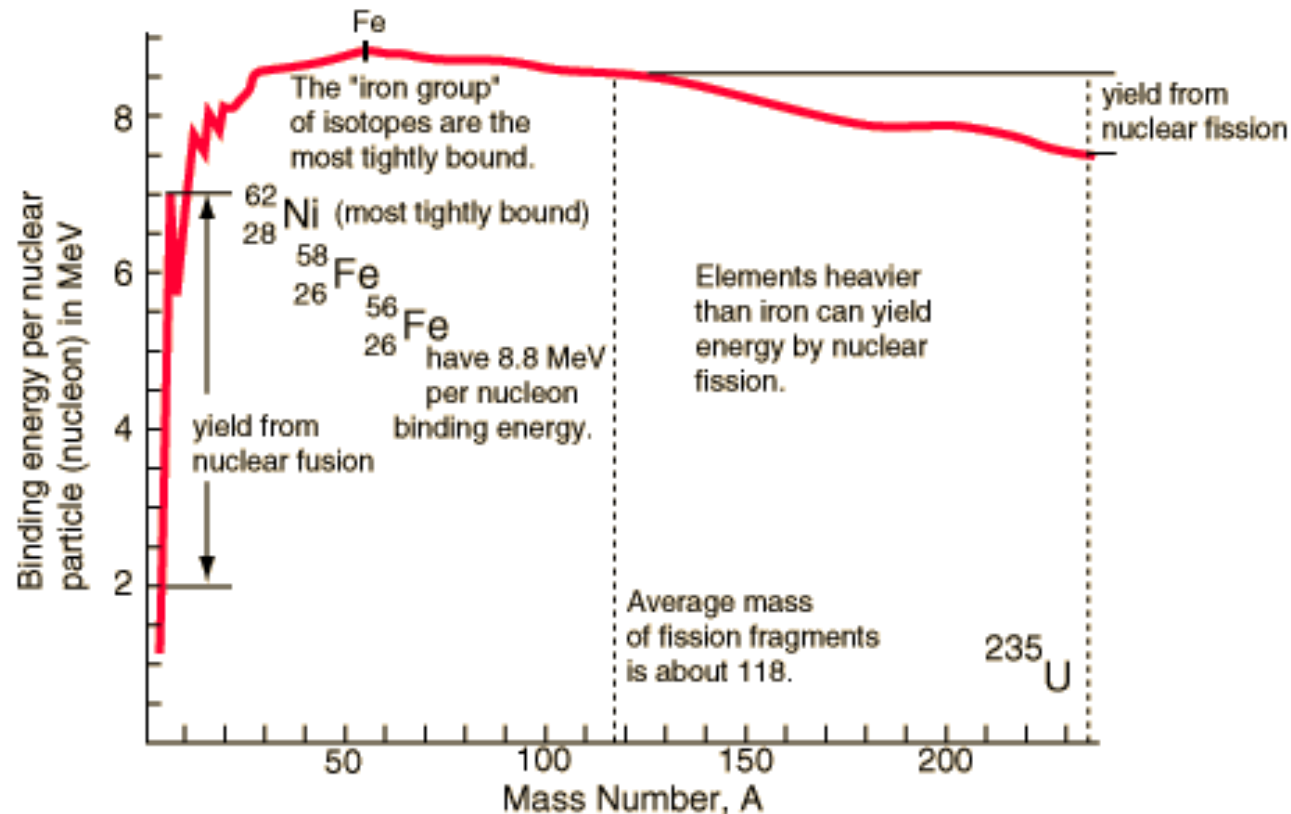
I nuclei di massa intermedia hanno i valori di  $\Delta E_n$  più elevati e richiedono una elevata quantità di energia per poterli separare

I nuclei più leggeri e quelli più pesanti hanno valori di  $\Delta E_n$  più bassi e richiedono una minore quantità di energia per poterli separare

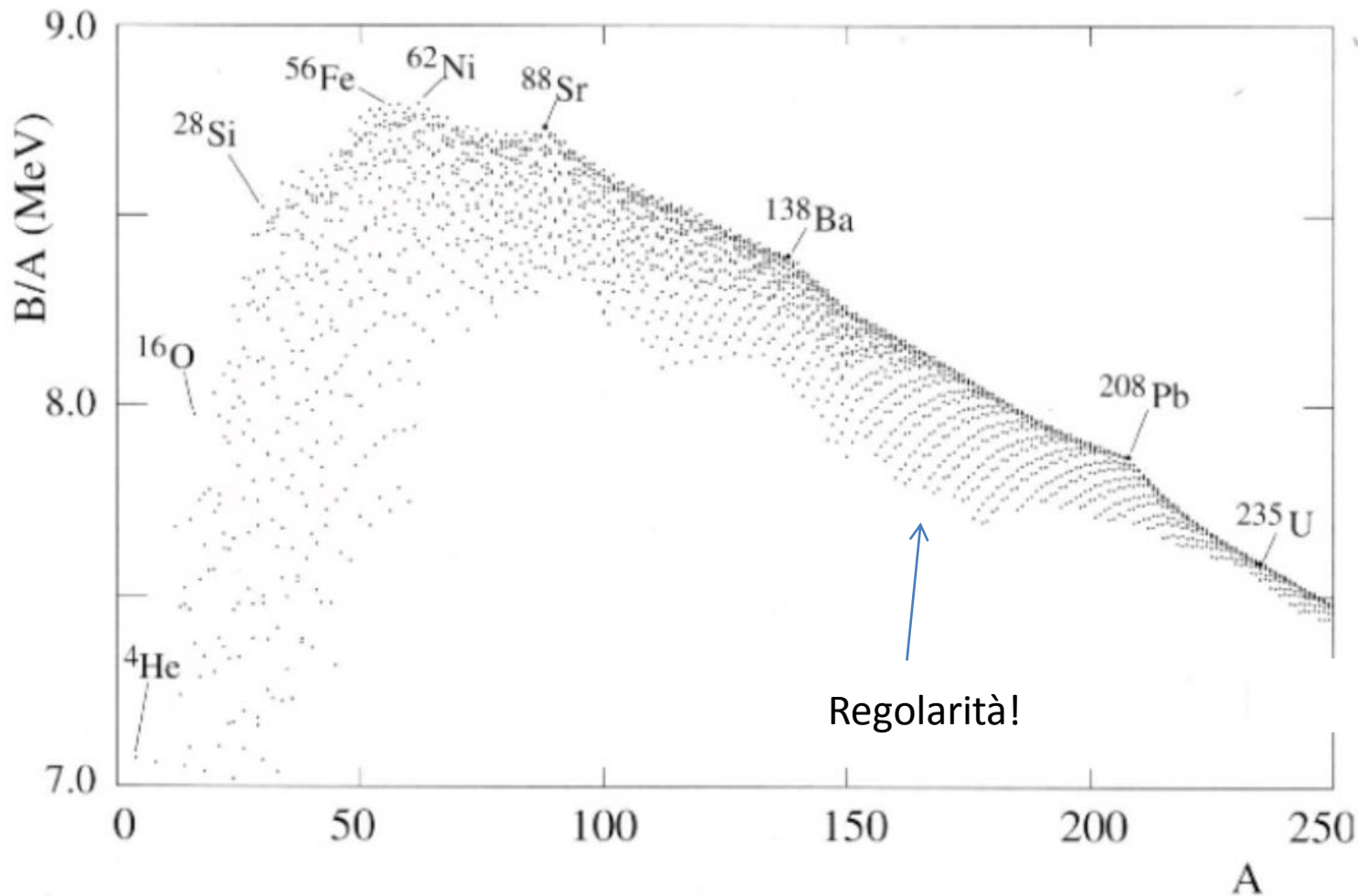
I nucleoni tendono a privilegiare situazioni in cui si trovano ad avere elevati  $\Delta E_n$



**Fissione Nucleare**  
**Fusione Nucleare**



# Energia di legame per nucleone per diversi isotopi

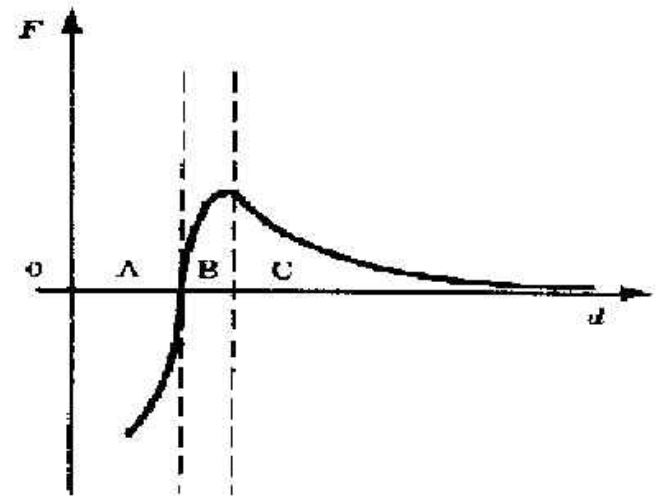


## Le forze nucleari

L'esistenza stessa del nucleo atomico ci pone un problema inesplicabile sulla base delle conoscenze della Fisica Classica, ma ci indica anche la via per la ricerca di una possibile soluzione: l'esistenza di altre forze, **le forze nucleari**, capaci di tenerlo assieme.

Le forze nucleari sono essenziali per la **stabilità del nucleo**.

Le forze nucleari devono essere intensissime, per poter tenere insieme, a distanza molto piccola, molti protoni con la stessa carica. Esse devono essere praticamente inefficienti al di fuori del nucleo atomico stesso, altrimenti della loro esistenza ci saremmo accorti ben prima, così come accade con le forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Saranno attive a distanze  $d < 10^{-15}$  m, ma inefficaci a distanze maggiori.



**Nel tratto C (  $d > 10^{-14}$  m )** agiscono solo le forze repulsive coulombiane.

**Nel tratto B (  $10^{-15}$  m  $< d < 10^{-14}$  m )** si manifestano le forze nucleari che si oppongono a quelle elettriche.

**Nel tratto A (  $d < 10^{-15}$  m )** prevalgono le forze nucleari attrattive.

## Il deutone

E' il nucleo più semplice, costituito da un protone e un neutrone.

Lo stato legato ha una energia di 2.225 MeV;

Non vi è una (rilevante) interazione elettromagnetica;

Ha spin (momento angolare totale) pari a 1

Ha un momento magnetico pari a  $\mu_d = 0,8574 \mu_N = \mu_p + \mu_n + 0,022 \mu_N$        $\mu_N = \mu_p = \frac{e\hbar}{2m_p}$

Ha un momento di quadrupolo elettrico  $Q = 2,82 \times 10^{-27} \text{ cm}^2$

Non esistono stati legati di due protoni o di due neutroni o stati protone-neutrone con spin 0.

→ è ragionevole assumere che lo stato fondamentale sia uno stato di onda S ( $l = 0$ )

→ Lo spin 1 sembra dovuto all'allineamento degli spin del protone e del neutrone, testimoniato dalla quasi addittività dei momenti magnetici.

→ L'energia per nucleone è circa 1 MeV, contro gli 8 tipici dei nuclei più pesanti; questo indica uno stato debolmente legato.

→ L'assenza di stati legati con spin 0 indica una forte dipendenza delle forze nucleari dallo spin. Questo è confermato dall'assenza di stati legati di due protoni o di due neutroni.



# The Deuteron – Measured Binding energy

- Mass doublet method

$$m(^2\text{H}) = 2.014101789 \pm 0.000000021 \text{ u}$$

$$m(^2\text{H}) = 2.014101771 \pm 0.000000015 \text{ u}$$

$$B = [m(^1\text{H}) + m(n) - m(^2\text{H})]c^2 = \mathbf{2.22463 \pm 0.00004 \text{ MeV}}$$

- Measure energy released (gamma) on formation from a neutron and proton



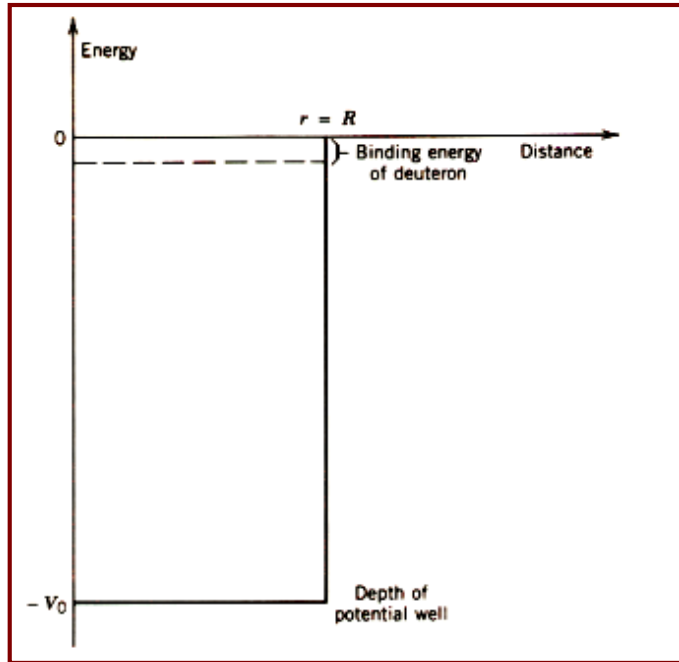
$$B = \mathbf{2.2245 \pm 0.000002 \text{ MeV}}$$

- Photodissociation



$$B = \mathbf{2.224 \pm 0.002 \text{ MeV}}$$

## Equazione di Schoedinger per il deutone



$$V(r) = -V_0 \quad \text{for } r < R$$

$$= 0 \quad \text{for } r > R$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}) + V(r) \Psi(\vec{r}) = E \Psi(\vec{r})$$

$$\Psi(r) = R_{nl}(r) Y_{lm}(\theta, \varphi) = \frac{u_{nl}(r)}{r} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} + \left\{ V(r) + \frac{l(l+1)\hbar^2}{2mr^2} \right\} u(r) = E u(r)$$

negli stati di onda S

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} - V_0 u(r) = E u(r) \quad , \text{ per } 0 < r < R \\ -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} = E u(r) \quad , \text{ per } r > R \end{array} \right.$$

## Equazione di Schoedinger per il deutone

Per  $r > R$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} = Eu(r)$$

$$u(r) = Ce^{-k_2 r} + De^{+k_2 r}$$

con

$$k_2 = \sqrt{\frac{-2mE}{\hbar^2}}$$

Cerco soluzioni normalizzabili:

$$\lim_{r \rightarrow \infty} u(r) = 0$$

$$D = 0$$

$$u(r) = Ce^{-k_2 r}$$

Per  $r < R$

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2 u}{dr^2} - V_0 u(r) = Eu(r)$$

$$\frac{d^2 u}{dr^2} + k_1^2 u(r) = 0 \quad \text{con}$$

$$k_1 \equiv \sqrt{\frac{2m(E + V_0)}{\hbar^2}}$$

$$u(r) = A \sin k_1 r + B \cos k_1 r$$

Cerco soluzioni normalizzabili:

$$\lim_{r \rightarrow 0} \psi(r) = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{u(r)}{r} = \text{finito}$$

$$B = 0$$

$$u(r) = A \sin k_1 r$$

Continuità per  $r = R$ : relazione sulle funzioni d'onda e sulle sue derivate

Continuità della  $u(r)$ :

$$C = f(A)$$

A è determinata dalla normalizzazione globale

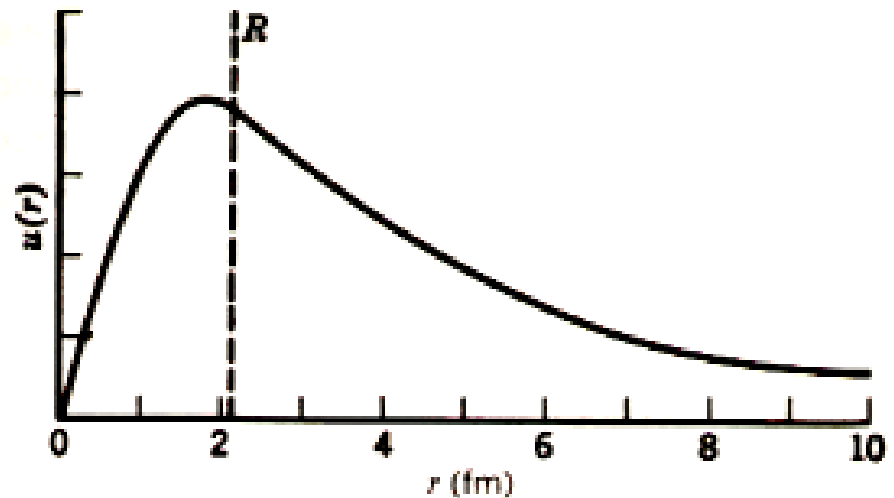
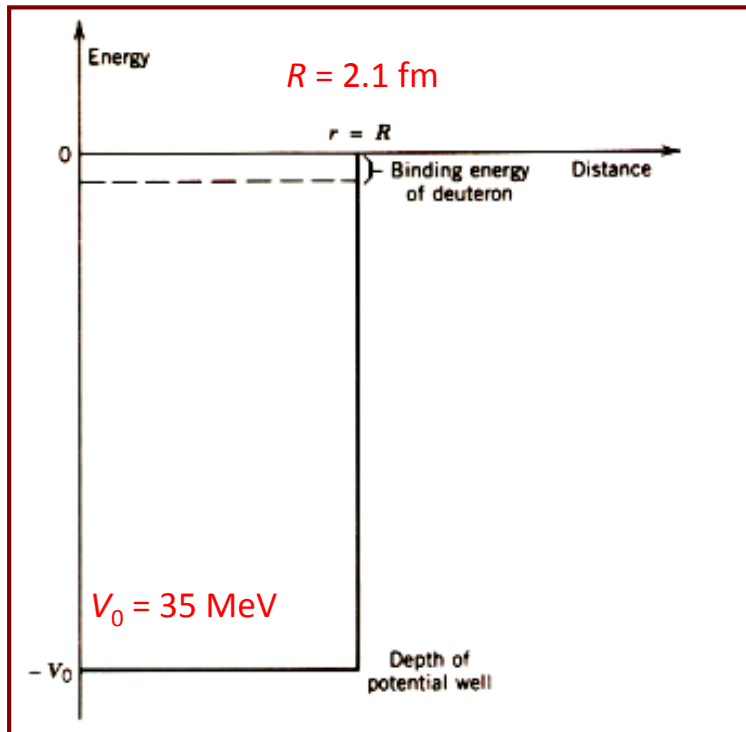
## Funzione d'onda del deutone

Continuità della derivata di  $u(r)$  per  $r = R$

$$k_1 \cot k_1 R = -k_2$$

Relazione tra  $V$  e  $R$   
soddisfatta in un numero finito di casi (quantizzazione)

Imponendo che l'energia di legame sia 2.225 MeV si ottiene:  $R = 2.1 \text{ fm}$ ,  $V_0 = 35 \text{ MeV}$ .



Stato molto debolmente legato!  
È più probabile trovare il deutone fuori  
dalla buca che dentro.

## Modelli di descrizione del nucleo

La descrizione dei nuclei è assai più complicata di quella degli **atomi**. Per questi ultimi la legge che governa la forza fondamentale (legge di Coulomb) è di forma semplice. Esiste poi un centro naturale delle forze che è il nucleo.

Per i nuclei la legge che ne governa le forze è molto complessa. Inoltre non si ha un “centro geometrico” (cui applicare le forze) che consenta una semplificazione dei calcoli. Anche per questi motivi, non esiste una teoria generale della struttura nucleare che consenta una spiegazione di tutti i fenomeni osservati in natura (o in laboratorio). Sono pertanto stati “costruiti” dei modelli nucleari.

Esistono due tipologie di modelli che descrivono in modo sufficientemente valido le caratteristiche dei nuclei (*nessun modello è comunque in grado di descrivere tutte le proprietà “note” dei nuclei*).

***Modelli collettivi***

***Modelli a particelle indipendenti***

## Modello a goccia o drop model

Il modello a goccia è un modello collettivo secondo il quale il nucleo viene considerato all'incirca come una goccia d'acqua. Esso rappresenta con pochi parametri l'energia di legame in analogia con l'energia di una goccia di liquido. Il modello si basa sulle seguenti ipotesi:

- l'energia di interazione tra due nucleoni è indipendente dal tipo e numero di nucleoni;
- l'interazione è attrattiva e a breve raggio d'azione,  $R_{int}$  (come nel caso delle gocce di liquido in cui le molecole hanno interazioni dipolo-dipolo);
- l'interazione è repulsiva a distanze  $r \gg R_{int}$ ;
- l'energia di legame del nucleo è proporzionale al numero di nucleoni.

Queste ipotesi implicano che le forze nucleari siano *saturate*, cioè che *ciascun nucleone* sia fortemente legato solo a pochi nucleoni.

## Modello a guscio o shell model

Il **modello a guscio** o **a strati** è un **modello a particella indipendente**: i nucleoni sono visti come particelle che sottostanno alla meccanica quantistica; in modo abbastanza simile a come gli elettroni si dispongono in orbitali energetici attorno al nucleo, i nucleoni si dispongono in livelli energetici (o **orbitali nucleari**).

**CHIMICA - Il modello atomico di Bohr-Sommerfeld-Dirac fondato su :**

- *potenziale coulombiano a simmetria radiale ( $R_{\text{nucleo}} \ll R_{\text{atomo}}$ );*
- *centro del potenziale ben definito ( $M_{\text{nucleo}} \gg m_{\text{elettroni}}$ );*
- *leggi di quantizzazione del momento angolare;*
- *principio di Pauli  $\rightarrow$  gli elettroni sono fermioni; hanno funzioni d'onda antisimmetrizzate*

riproduce con successo la fenomenologia chimica degli atomi: i livelli energetici, la tavola periodica degli elementi, la valenza, . . . Gli autostati sono definiti dai numeri quantici  **$n, \ell, m, s$** . Si ha:  **$n = 1, 2, 3, \dots$** ;  **$\ell = 0, \dots, n - 1$**  ;  **$m = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$**  ;  **$s = \pm \frac{1}{2}$**

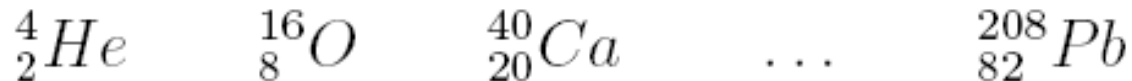
Il numero di stati definisce le proprietà atomiche.

Gli **elementi nobili**,  $Z = 2, 10, 18, 36, \dots$ , (**Elio, Neon, Argon, Cripton, Xenon**) sono **caratterizzati da momento angolare totale  $J = 0$ , energia di legame elevata, bassa reattività chimica.**

Nel caso dei **NUCLEI** si osservano delle configurazioni particolarmente stabili quando il numero di protoni,  $Z$ , oppure il numero di neutroni  $N$ , è uguale a 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 detti **numeri magici**. I nuclei con numeri magici hanno particolari caratteristiche

- esistono molti nuclei isobari;
- hanno energia di legame grande;
- hanno una piccola sezione d'urto nucleare.

Le tre proprietà sono accentuate nei **nuclei doppiamente magici** quali

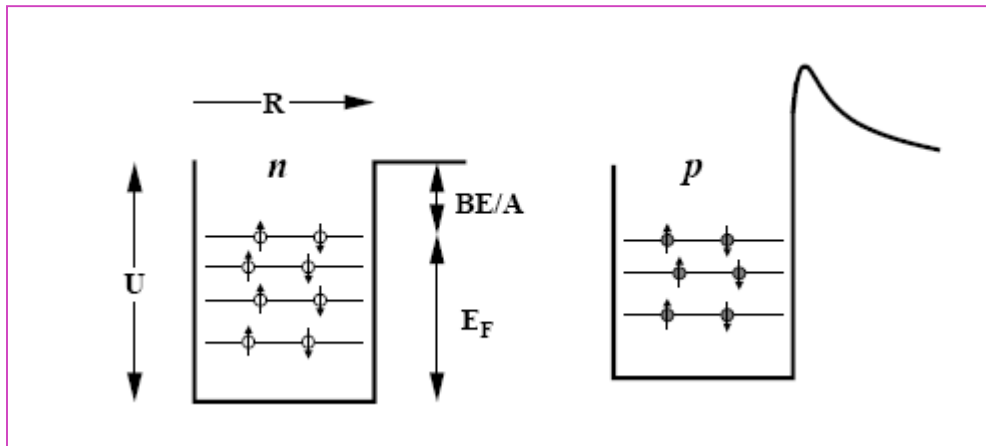


- hanno spin  $I = 0$ , momento di dipolo magnetico e di quadrupolo elettrico nulli ;

Si è cercato di impostare un modello del nucleo basato sulla soluzione di una equazione del moto che fosse in grado di riprodurre i numeri magici.



Varie difficoltà hanno condotto, anche sulla base del **modello del nucleo a gas di Fermi** (per il quale ciascun nucleone è in uno stato quantico e non viene in collisione con un altro nucleone se non con un meccanismo di scambio), a impostare un'equazione del moto per il *singolo nucleone cioè a un modello a particelle indipendenti*.



Livelli di energia nel modello a gas di Fermi

Per i neutroni la profondità della buca di potenziale è pari alla somma dell'energia di Fermi (circa 30 MeV) e dell'energia di legame per nucleone

Per i protoni, la buca di potenziale è deformata dall'energia elettrostatica che produce una *barriera di potenziale*

Secondo il modello a strati i nucleoni sono disposti, all'interno del nucleo, su livelli energetici. Esso può fare previsioni sullo spin, parità, momento di dipolo magnetico e di quadrupolo elettrico dei nuclei. Data la semplicità del modello, queste previsioni non sono molto accurate, ma costituiscono una utile base per esaminare la fenomenologia dei nuclei e impostare estensioni del modello per tener conto delle differenze osservate.

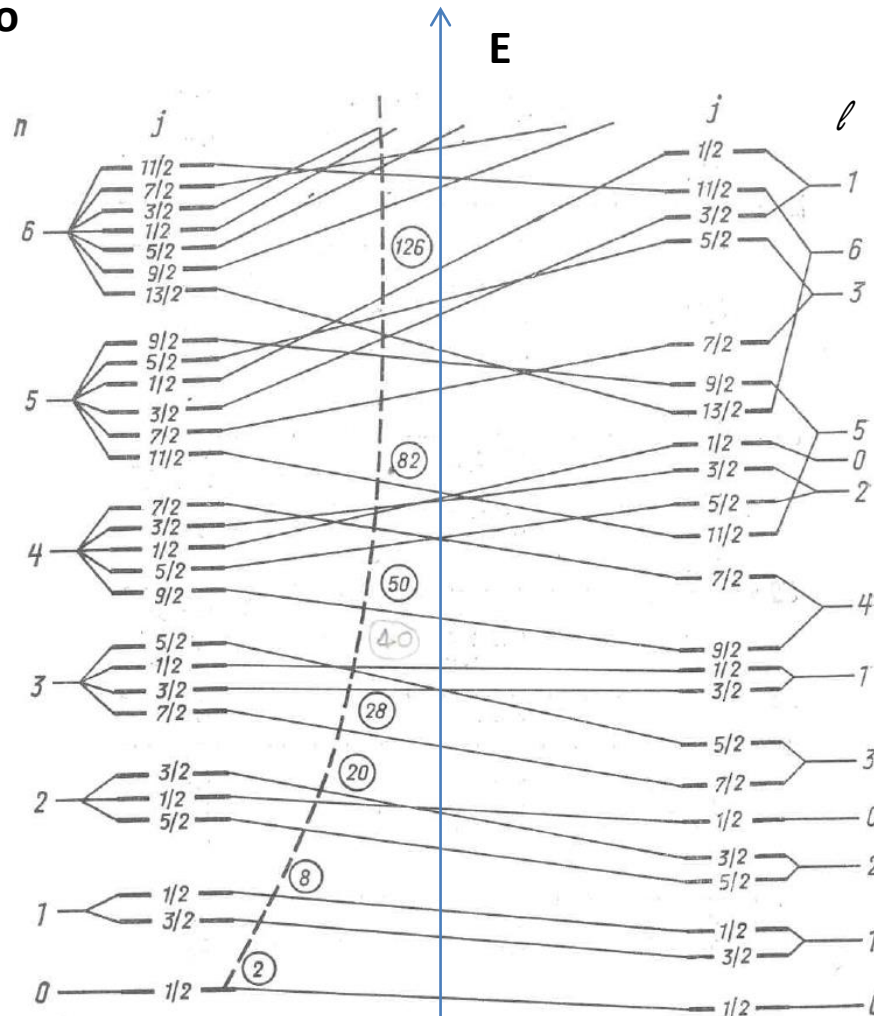
# Potenziali per modelli a guscio

## Potenziale armonico

$$V_a(r) = \frac{k}{2} r^2$$

## Interazione spin-orbita

$$V = V_a(r) + \alpha \vec{L} \cdot \vec{s}$$



## Buca di potenziale

$$V_b(r) = \begin{cases} 0 & \text{per } r > R \\ -V_0 & \text{per } r < R \end{cases}$$

## Interazione spin-orbita

$$V = V_b(r) + \alpha \vec{L} \cdot \vec{s}$$

## Previsioni:

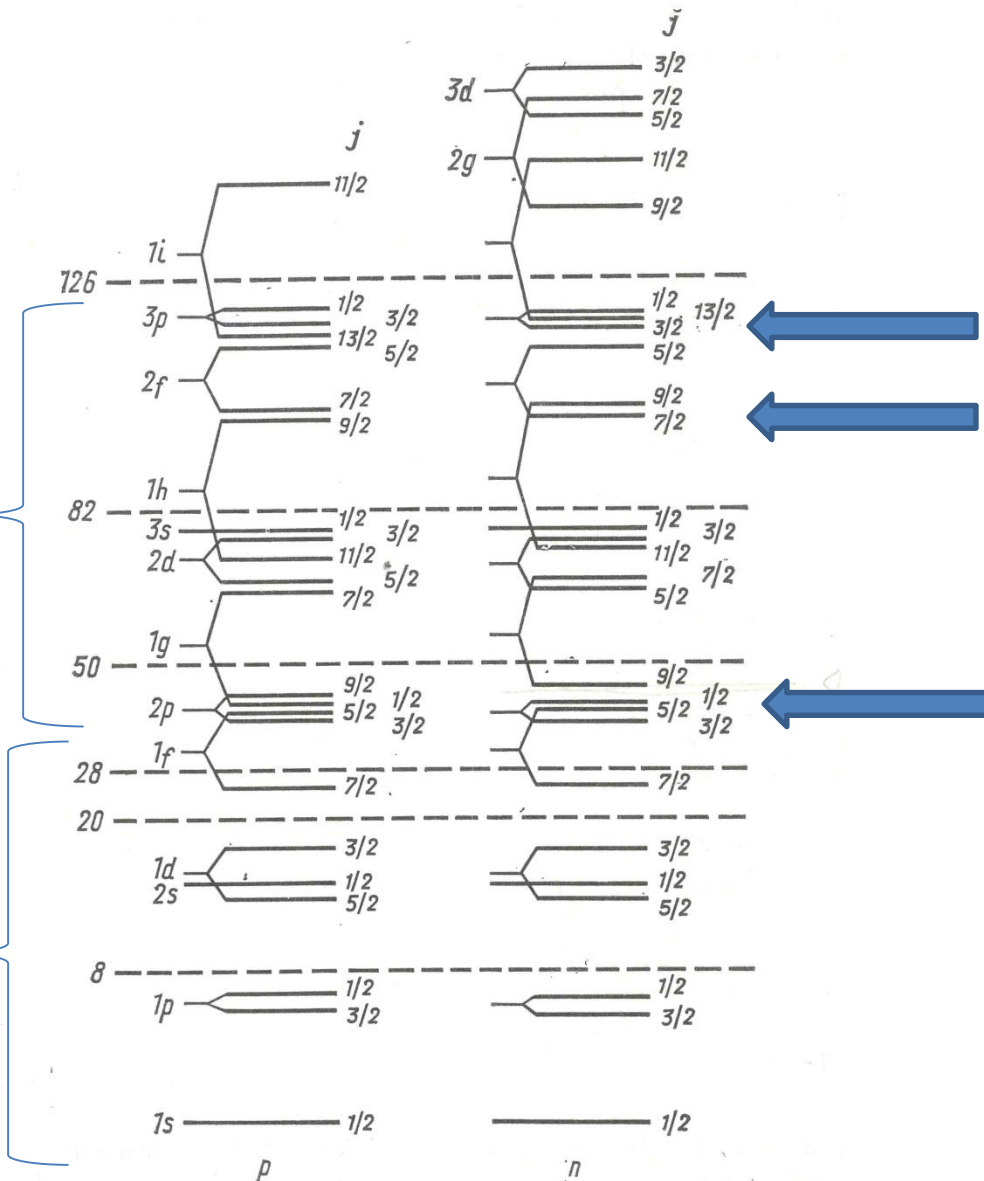
$^5\text{He}, ^5\text{Li}$ : spin 3/2

$^{17}\text{F}, ^{17}\text{O}$ : spin 5/2

# Effetti dell'interazione coulombiana

Ad alto Z, la repulsione coulombiana cambia di poco i livelli dei protoni

Se i protoni sono pochi, I livelli energetici dei protoni e dei neutroni sono uguali



# Le trasformazioni del nucleo: la radioattività

Esistono nuclidi **stabili** e nuclidi **instabili**.

Quando un nucleo è **stabile** lo si considera nello stato fondamentale. La stabilità dipende dal valore particolarmente alto dell'energia di legame e corrisponde alla difficoltà di estrarre dal nucleo qualcuno dei suoi costituenti.

Un nucleo può trovarsi in uno stato "eccitato" o **instabile**. In tal caso esso **tende** a portarsi in uno stato stabile  **radioattività**. Si dice che il nucleo "**decade**".

La **radioattività** (*emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo*) è un fenomeno **naturale**. Scoperta nel 1896 da **Henri Becquerel** che notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio. (*Esiste anche una radioattività indotta o artificiale*)

Le osservazioni sperimentali hanno permesso di trarre conclusioni importanti sul legame esistente tra il numero di nucleoni presenti in un nucleo e la sua stabilità. Per piccoli valori di  $Z$  e di  $N$  le configurazioni nucleari stabili corrispondono a un numero uguale di protoni e di neutroni ( $Z = N$ ); al crescere di  $Z$  il numero di neutroni necessari a garantire la stabilità aumenta, superando di gran lunga il numero di protoni presenti nello stesso atomo.

Nel caso di radioattività “artificiale”, la configurazione del nucleo viene alterata attraverso un cambiamento di energia indotto dall'esterno, per esempio bombardandolo con particelle, cioè mediante reazioni nucleari.

Il decadimento dei nuclei radioattivi (sia naturali che artificiali) può avvenire in diversi modi :

**decadimento  $\alpha$**  : *emissione di nuclei di elio;*

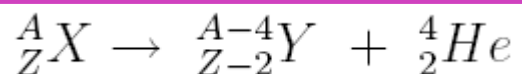
**decadimento  $\beta$**  : *emissione di elettroni o positroni;*

**decadimento  $\gamma$**  : *emissione di radiazione elettromagnetica;*

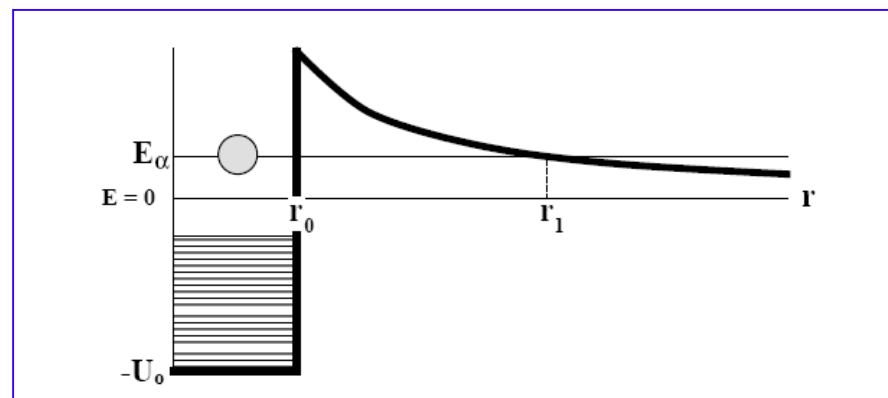
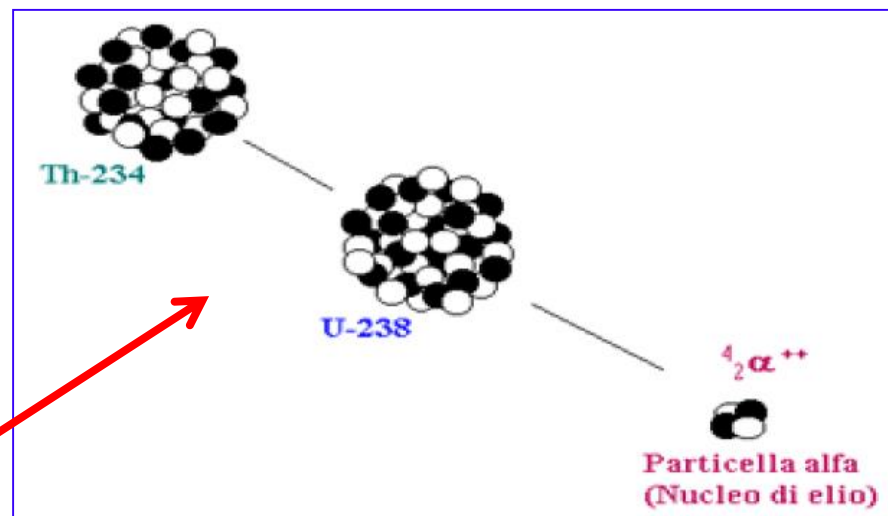
*La trasformazione di un atomo (nucleo) radioattivo porta alla produzione di un altro atomo (nucleo), che può essere anch'esso radioattivo oppure stabile. Essa è chiamata disintegrazione o decadimento radioattivo.*

La trasformazione di un nucleo radioattivo può anche avvenire per **fissione spontanea**. Il nucleo si scinde in due o più nuclei.

**Decadimento Alfa ( $\alpha$ ):** Consideriamo un nucleo con numero atomico  $Z$  e numero di massa  $A$ . In seguito ad un decadimento alfa, il nucleo emette una particella  $\alpha$ , cioè un nucleo di elio composto da due protoni e due neutroni, e si trasforma in un nucleo diverso, con numero atomico  $(Z - 2)$  e numero di massa  $(A - 4)$ . Un esempio è il decadimento dell'uranio-238 in torio-234

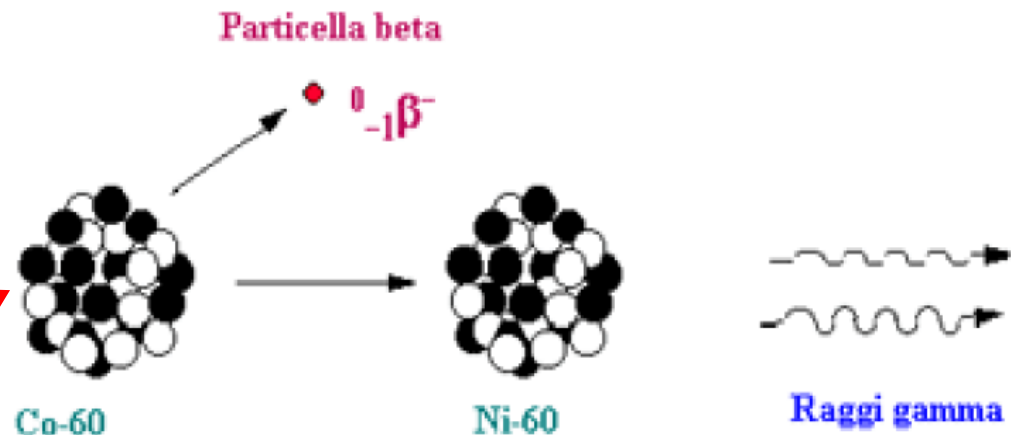


L'emissione di particelle alfa da parte del nucleo può avvenire grazie ad un processo caratteristico della fisica quantistica detto effetto tunnel: i due protoni e i due neutroni riescono in pratica a sfuggire pur possedendo una quantità d'energia insufficiente a rompere i legami nucleari.

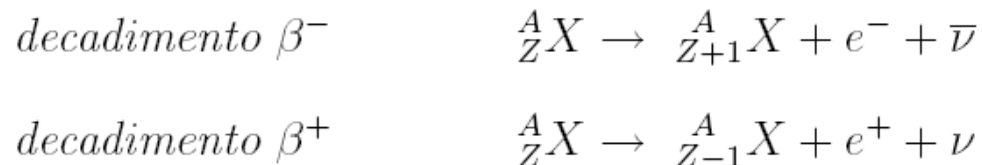


Modello di Gamow del decadimento  $\alpha$

**Decadimento Beta ( $\beta^-$ ):** Il nucleo emette un elettrone e un antineutrino e si trasforma in un nucleo con numero atomico ( $Z + 1$ ) ma stesso numero di massa  $A$ . Un esempio è il decadimento del Cobalto-60 ( $Z=27$ ,  $N=33$ ) in Nichel-60 ( $Z=28$ ,  $N=32$ )



**Decadimento Beta ( $\beta^+$ ):** Il nucleo emette un positrone e un neutrino e si trasforma in un nucleo con numero atomico ( $Z - 1$ ) ma stesso numero di massa  $A$ .



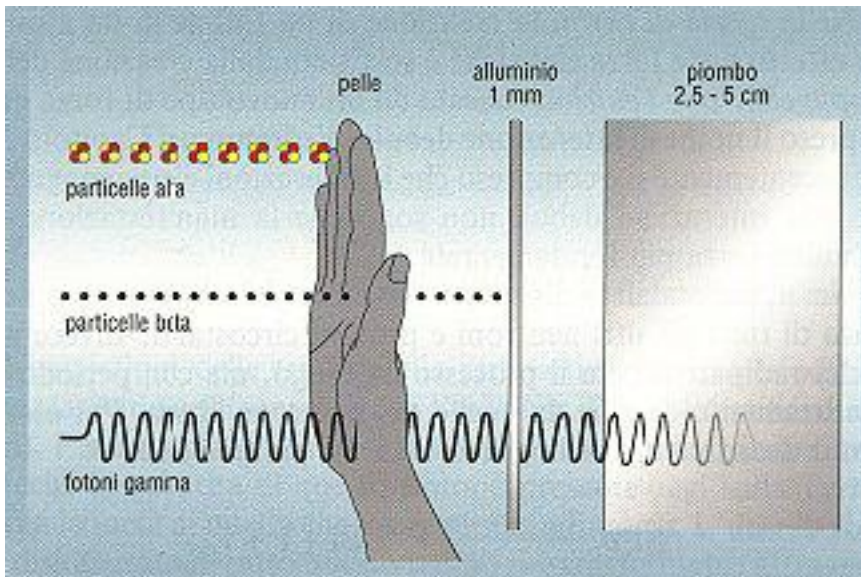
**Decadimento Gamma ( $\gamma$ ):** Il nucleo non si trasforma ma passa semplicemente in uno stato di energia inferiore ed emette un **fotone**. La radiazione gamma accompagna solitamente una radiazione alfa o una radiazione beta.

## Potere penetrante delle diverse radiazioni.

**Le radiazioni alfa, per la loro natura, sono poco penetranti e possono essere bloccate da un semplice foglio di carta**

**Le radiazioni beta sono più penetranti di quelle alfa, ma possono essere bloccate da piccoli spessori di materiali metallici (ad esempio, pochi millimetri di alluminio)**

**Le radiazioni gamma sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono materiali ad elevata densità come il piombo**



### Problema dello schermaggio

**Le radiazioni possono produrre danneggiamenti sui materiali che incontrano (ad esempio sui tessuti umani). E' quindi importante conoscere il loro potere penetrante per definire in modo adeguato schermi necessari per le protezioni dei materiali stessi.**



## Legge di decadimento dei materiali radioattivi

L'**attività**, definita come *il numero di decadimenti nell'unità di tempo*, decresce nel tempo con legge esponenziale.

L'**unità di misura della attività** è il **becquerel (Bq)**. 1 Bq corrisponde a 1 disintegrazione al secondo. Poiché questa unità di misura è assai piccola, la radioattività si esprime molto spesso in multipli di Bq: il kBq, il MBq e il GBq.

In precedenza si usava il **Curie (Ci)** definita come la quantità di radioattività presente in un grammo di radio.  $1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq} = 37 \text{ miliardi di Bq}$ .

**Il processo di decadimento è casuale e si può interpretare sulla base delle seguenti ipotesi:**

- *La probabilità di decadimento nell'unità di tempo è una proprietà della sostanza e del processo di decadimento che si considera e non dipende dal tempo*
- *In una sostanza contenente  $N$  nuclei, la probabilità di decadimento nell'unità di tempo del singolo nucleo non dipende da  $N$*

Quindi la probabilità di decadimento in un intervallo di tempo  $dt$  è:  $dP = \lambda dt$

dove  $\lambda$  è la **costante di decadimento** caratteristica del processo e ha dimensioni  $[s^{-1}]$ .

Conoscendo il valore di  $N$  a un certo istante,  $N(t=0) = N_0$ , si ottiene l'andamento nel tempo del numero di nuclei (**legge del decadimento**) e dell'attività  $A$  della sostanza

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad A(t) = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

Il valore medio della distribuzione è la **vita media  $\tau$  del decadimento**

$$\tau = \frac{\int_0^\infty t N(t) dt}{\int_0^\infty N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

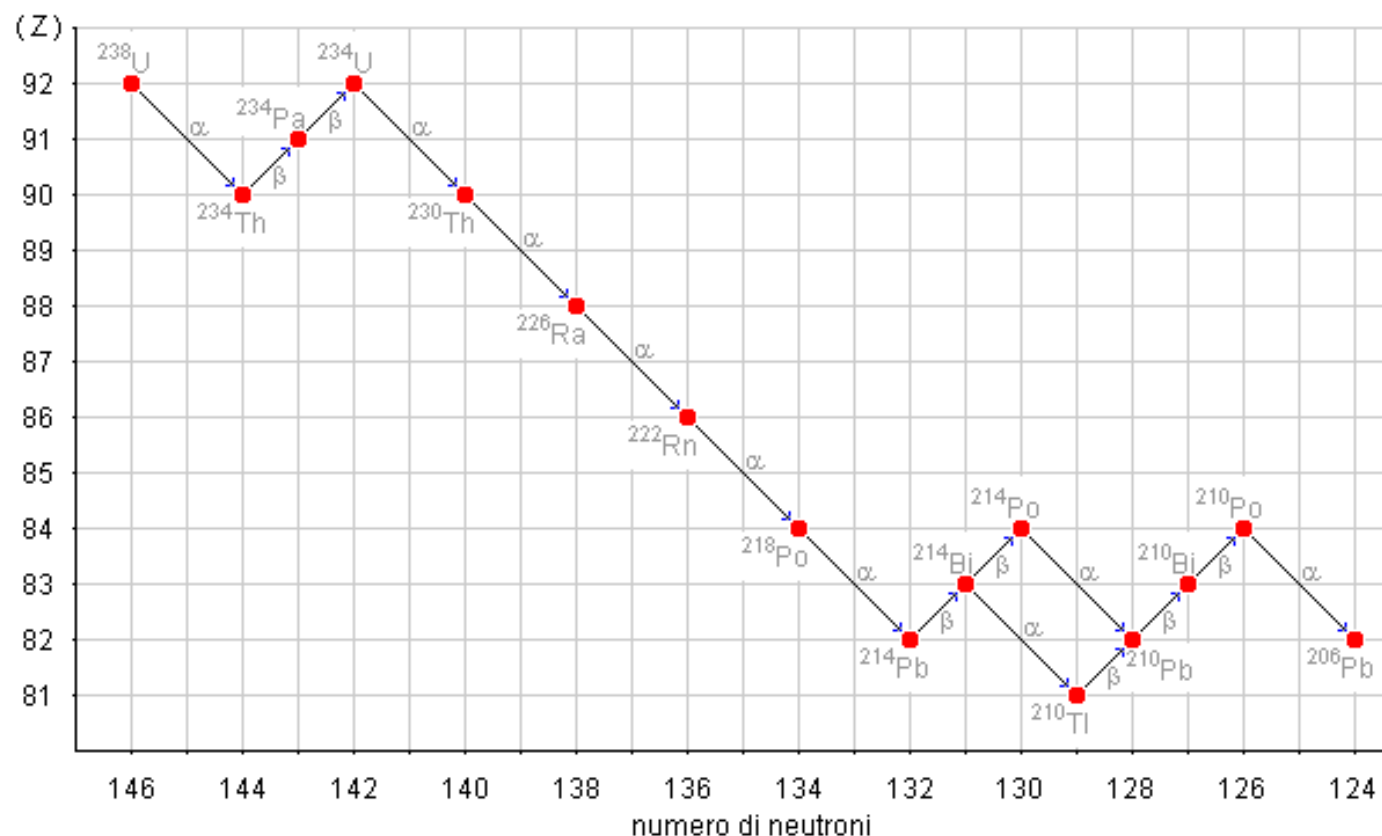
La “vita media” del radioisotopo può variare da frazioni di secondo a miliardi di anni

In fisica dei nuclei si quota di solito il **tempo di dimezzamento  $t_{1/2}$  (emivita)** definito come l'intervallo di tempo in cui il numero di nuclei si dimezza

$$\int_0^{t_{1/2}} \lambda N(t) dt = \int_{t_{1/2}}^\infty \lambda N(t) dt = \frac{N_0}{2} \quad \Rightarrow \quad t_{1/2} = \tau \ln 2 = 0.693 \tau$$

# Serie di decadimento dei materiali radioattivi

Serie radioattiva dell'uranio



## URANIO 238 (U238) DECADIMENTO RADIOATTIVO

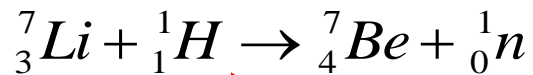
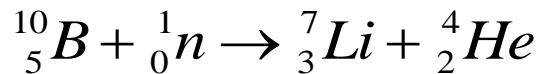
tipo di radiazione	nuclide	tempo di dimezzamento
α	uranio-238	4.47 miliardi di anni
β	torio-234	24.1 giorni
β	protattinio-234m	1.17 minuti
α	uranio-234	245000 anni
α	torio-230	75200 anni
α	radio-226	1600 anni
α	radon-222 (*)	3.823 giorni
α	polonio-218	3.05 minuti
β	piombo-214	26.8 minuti
β	bismuto-214	19.7 minuti
α	polonio-214	0.000164 secondi
β	piombo-210	22.3 anni
β	bismuto-210	5.01 giorni
α	polonio-210	138.4 giorni
α	piombo-206	stabile

# Le trasformazioni del nucleo: le reazioni nucleari

Col termine **reazione nucleare** si intende un evento nel quale nucleoni vengono cambiati all'interno di un nucleo o scambiati tra nuclei, come gli elettroni che venivano scambiati tra atomi in una reazione chimica. *Anche la radioattività è una forma di reazione nucleare (che avviene spontaneamente).*

Solitamente però si considerano reazioni nucleari quelle indotte colpendo un nucleo con un'altra particella.

Tre esempi di reazioni nucleari (ed anche due modi diversi di loro scrittura) sono:



L'ultimo esempio riguarda una reazione nucleare con la quale vengono prodotti neutroni monoenergetici

Le reazioni nucleari possono essere:

**esotermiche** (la massa diminuisce e l'energia cinetica aumenta), **DI PARTICOLARE INTERESSE**

**endotermiche** (la massa aumenta e l'energia cinetica diminuisce)

Ci sono molti tipi di reazioni nucleari che possono essere divise (grossolanamente) in due gruppi:

- reazioni con formazione di un nucleo composto
- reazioni dirette.

Nel primo gruppo la particella “proiettile” viene catturata dal nucleo bersaglio formando (stato intermedio) un nucleo composto (instabile). Il successivo decadimento del nucleo intermedio è fortemente indipendente dal suo modo di formazione. La durata di vita dei nuclei intermedi è dell'ordine di  $10^{-16}$  s, molto lunga paragonata al tempo che il “proiettile” dovrebbe impiegare per attraversare il nucleo bersaglio (che è dell'ordine di  $10^{-22}$  s). Queste reazioni sono caratterizzate da **sezioni d'urto** con elevati picchi (di risonanza) per certe energie .

Nel secondo gruppo non si ha formazione di uno stato intermedio. Il tempo caratteristico dell'interazione è dell'ordine di  $10^{-22}$  s.

# Sezione d'urto nucleare

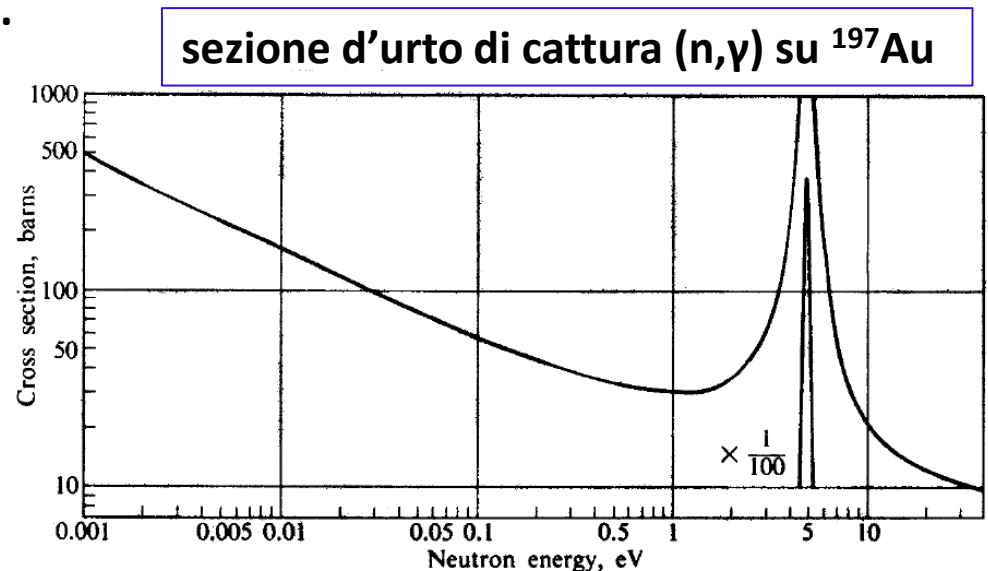
Un parametro caratteristico di ogni reazione nucleare è la **sezione d'urto  $\sigma$** : essa fornisce una indicazione della probabilità che ha tale reazione di avvenire.

La  $\sigma$  rappresenta l'area con cui una particella incidente ("proiettile") vede il nucleo bersaglio. Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area ( $\text{cm}^2$  o barns dove  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ ).

**La sezione d'urto per una certa reazione nucleare dipende:**

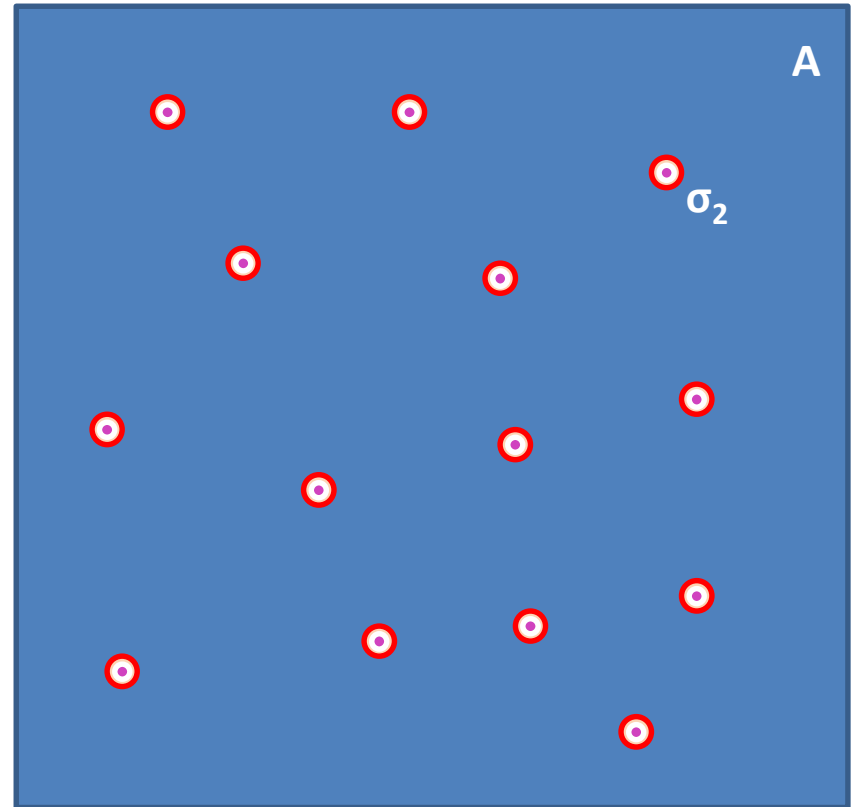
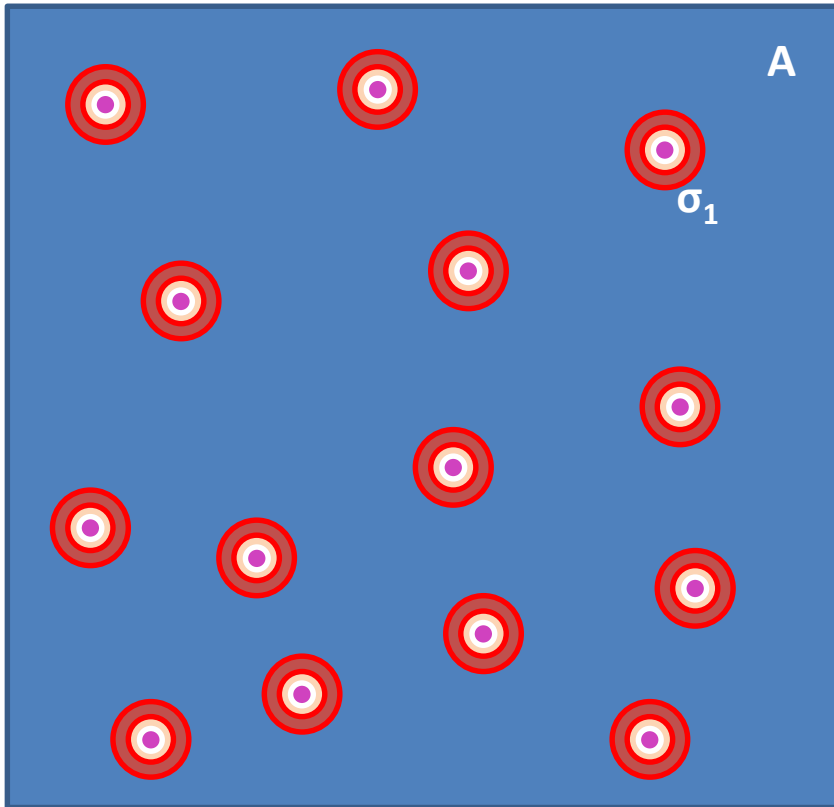
- dal tipo di particella incidente,
- dal nuclide bersaglio,
- dalla energia della particella incidente.

Consideriamo il caso di un neutrone come particella incidente. In generale, la  $\sigma$  decresce con l'aumentare della energia del neutrone. Tuttavia per certi valori di energia la  $\sigma$  può presentare un valore molto elevato. Si dice allora che la sezione d'urto ha una risonanza per quel valore dell'energia.

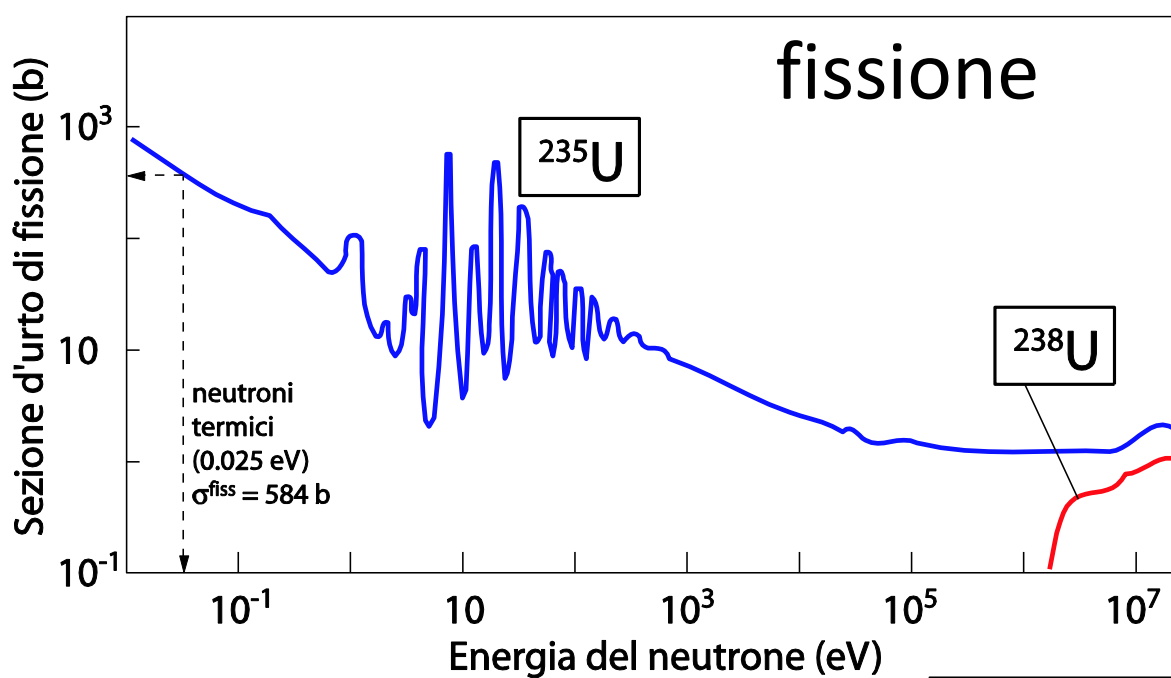


# Sezione d'urto nucleare

Una particella attraversa un'area  $A$  in cui ci sono  $N$  nuclei con sezione d'urto nucleare  $\sigma$ :



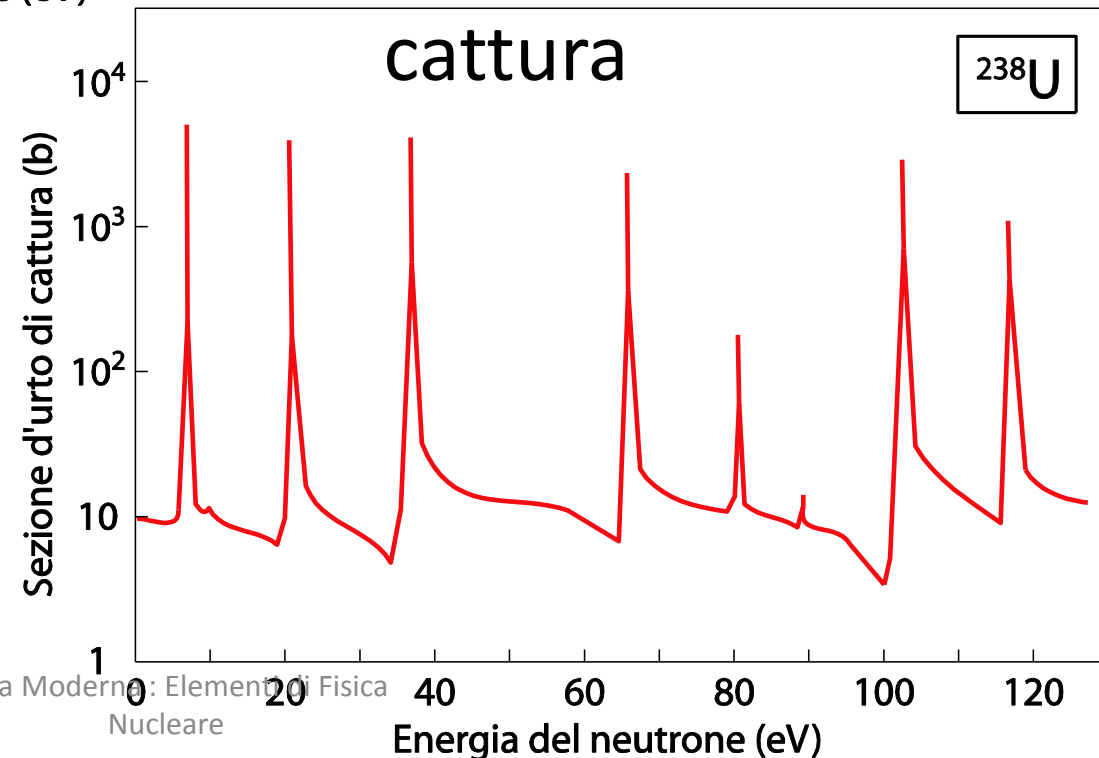
Modello ottico della sezione d'urto



## Sezioni d'urto

U-235 (e Pu-239): sezione d'urto massima alle energie termiche  
 U-238: energia di attivazione > 1 MeV

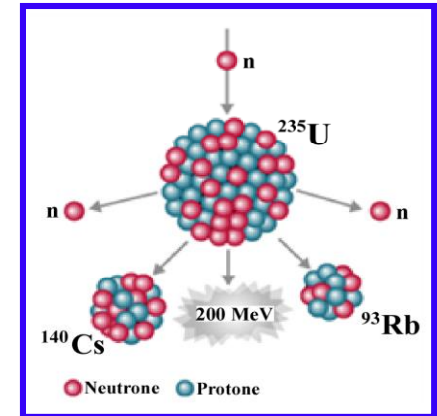
Inefficienza introdotta dal processo di moderazione a causa delle risonanze di cattura dell'U-238 (→ reattori “veloci”)  
 Necessaria opportuna progettazione di forma e distribuzione del moderatore nel nocciolo



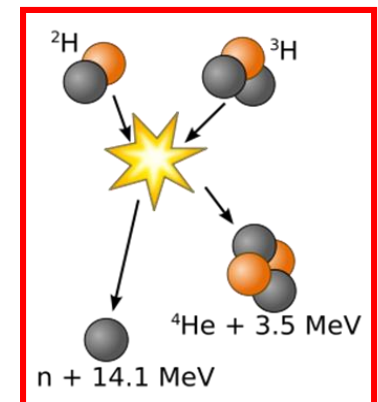


## Due reazioni nucleari rivestono una particolare importanza: La reazione di **Fissione** e La reazione di **Fusione**

In una reazione di **fissione nucleare** partendo dal nucleo di un atomo pesante si “costruiscono” nuclei di atomi più leggeri ed il difetto di massa porta alla liberazione di energia. Ad esempio, nella fissione dell’isotopo 235 dell’uranio ( $^{235}\text{U}$ ) mediante un neutrone “lento” (o *termico*) si libera una energia di circa 200 MeV (cioè  $3.2 \times 10^{-11}$  Joule).



In una reazione di **fusione nucleare** partendo da nuclei di atomi molto leggeri si “costruiscono” nuclei di atomi più pesanti ed il difetto di massa porta alla liberazione della corrispondente energia. Ad esempio la fusione dei due isotopi deuterio  $^2\text{H}$  e trizio  $^3\text{H}$  dell’idrogeno, porta a liberare una energia di circa 17.6 MeV (cioè  $2.8 \times 10^{-12}$  Joule).



Entrambe rappresentano una possibilità di elevata produzione di energia termica da utilizzare per la produzione di energia elettrica che esula dalla disponibilità di idrocarburi.

## Energia da fissione nucleare

La produzione di energia da **reazioni nucleari di fissione** può essere realizzata utilizzando come “*combustibile*” *vari elementi chimici quali, ad esempio, Uranio U e Torio Th (che esistono in natura) e Plutonio Pu (prodotto artificialmente da reazioni nucleari). Di ognuno di tali elementi esistono diversi isotopi.*



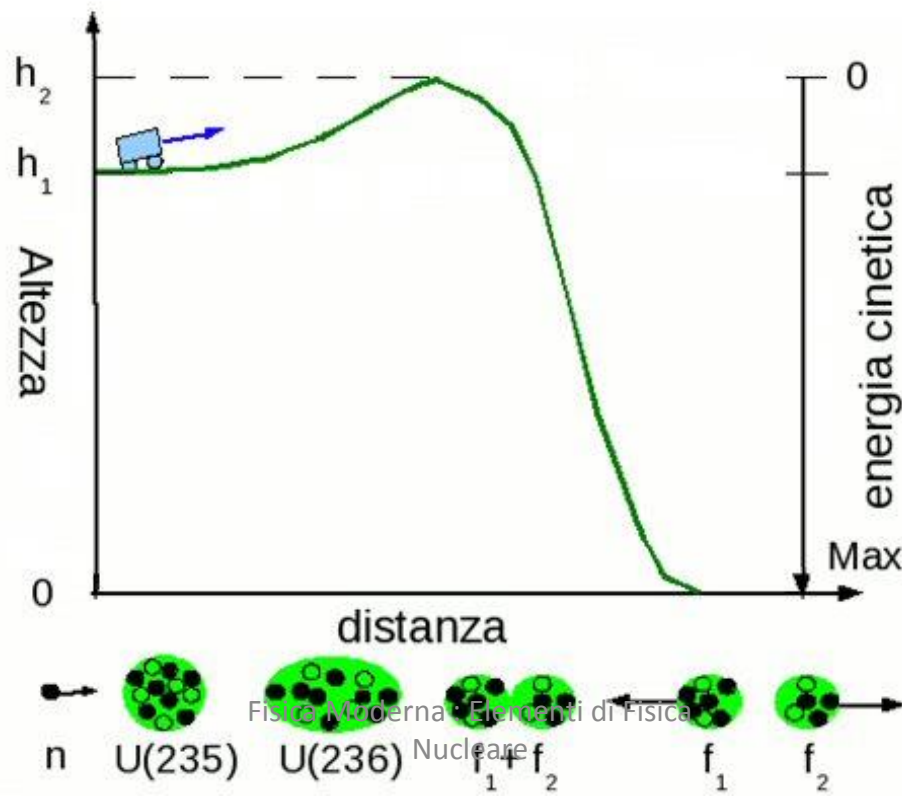
Alcuni isotopi sono fissili: se i loro nuclei sono colpiti da neutroni di energia opportuna possono subire la reazione di fissione del nucleo. In questo caso, si producono due nuclei più leggeri del nucleo bersaglio e alcuni (solitamente 2 o 3) neutroni. La massa totale dei “prodotti” (nuclei leggeri più neutroni) risulta leggermente inferiore alla massa dei “reagenti” (nucleo bersaglio più neutrone incidente). La differenza di massa (difetto di massa) si trasforma in energia (convertita quasi completamente in calore).

I neutroni prodotti possono poi, a loro volta, colpire altri nuclei fissili dando quindi luogo ad una **reazione a catena**, in grado di proseguire fino a quando sia disponibili materiale fissile.

Anche se i nuclei di tutti gli elementi con elevata massa atomica possono essere scissi se colpiti da un neutrone, è l'isotopo  $^{235}\text{U}$  dell'uranio a possedere un'elevata probabilità per la fissione anche se colpito da un neutrone lento (un neutrone lento rimane più a lungo nelle vicinanze del nucleo e quindi viene catturato più facilmente).

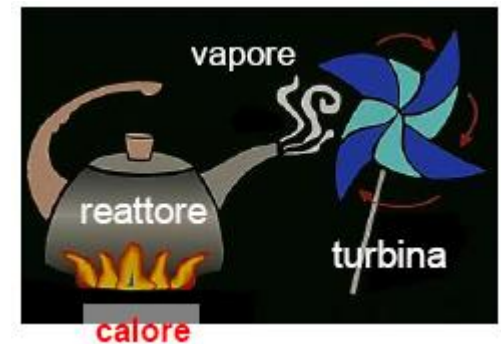
# LA FISSIONE NUCLEARE

- Nel processo si libera una quantita' notevole di energia che si manifesta come energia cinetica(velocita') dei due frammenti.
- In alcuni nuclei ( $U^{233}$ ,  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ), detti **fissili**, la cattura del neutrone e' tanto piu' probabile quanto piu' bassa e' la sua velocita

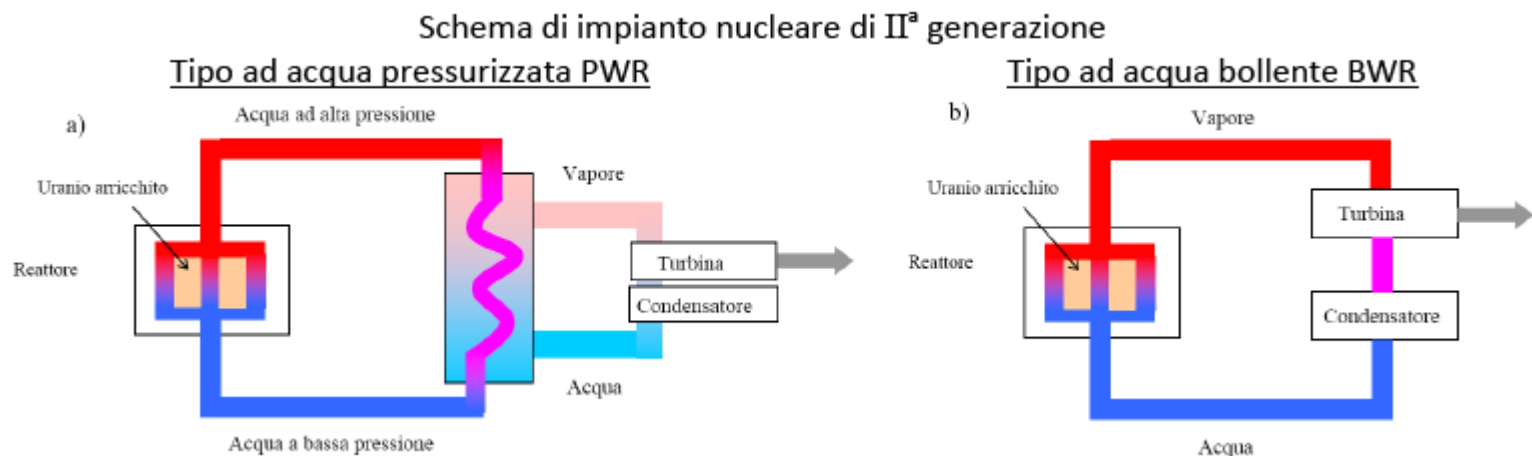


## Energia da fissione nucleare : i reattori nucleari termici

Poiché l'energia dei neutroni prodotti dalla fissione di un nucleo fissile è troppo elevata per poter dare luogo (con probabilità non trascurabile) a nuove fissioni e quindi a consentire la reazione a catena, si rende necessario diminuire l'energia cinetica dei neutroni (cioè rallentarli, o *moderarli*) fino a che essa non raggiunga un valore per la quale la sezione d'urto di fissione dei nuclei fissili è sufficientemente elevata. Gli impianti nucleari nei quali si sfrutta questo fenomeno per la produzione di energia (termica, come energia primaria, ed elettrica, come energia secondaria) sono i **reattori nucleari termici**.



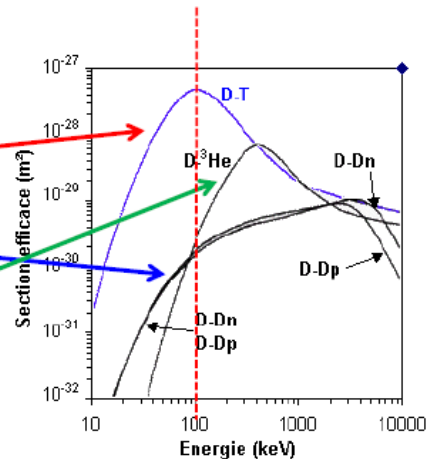
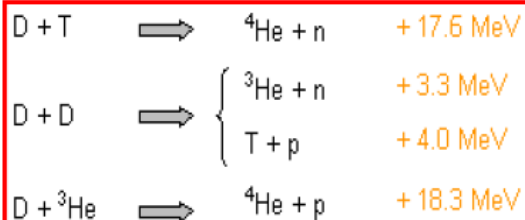
In base alla tecnologia utilizzata, le centrali elettriche utilizzanti reattori nucleari a fissione sono classificate di I<sup>a</sup>, II<sup>a</sup>, III<sup>a</sup> e IV<sup>a</sup> generazione. Attualmente circa 440 reattori nucleari (quasi tutti di II<sup>a</sup> generazione) sono operativi in più di 30 paesi. La potenza elettrica di ciascuno di tali impianti è di circa 600-900 MW elettrici (MWe).



## Energia da fusione nucleare

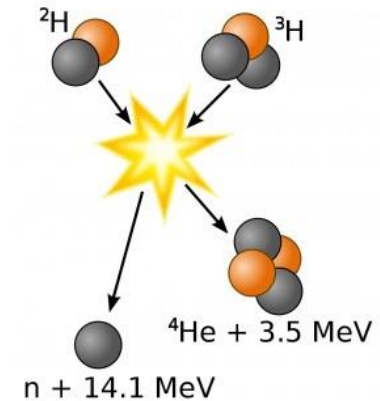
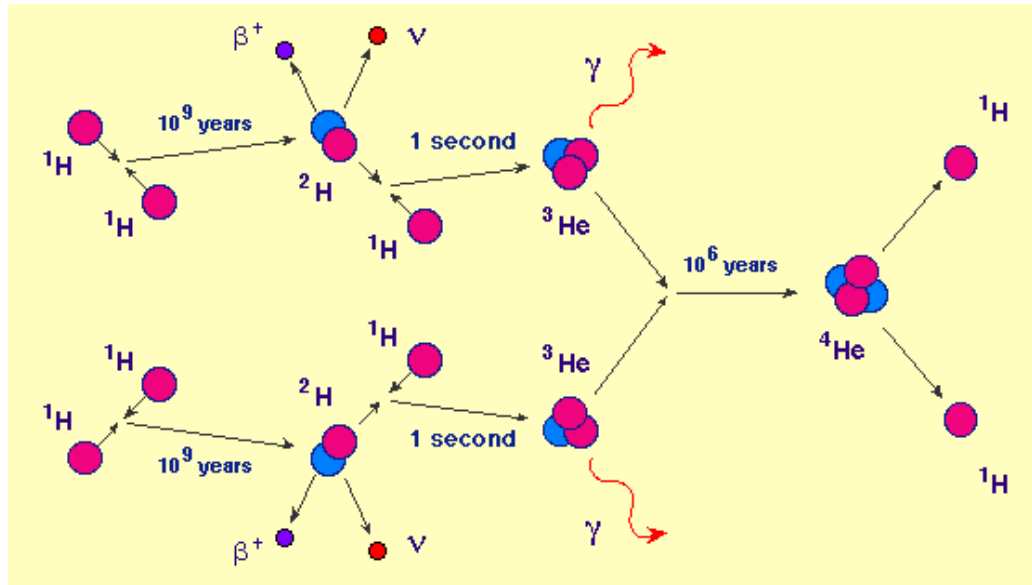
Affinché avvenga una **reazione di fusione nucleare** è necessario che i due nuclei leggeri arrivino praticamente a contatto tra loro (a distanze equivalenti alle dimensioni del nucleo). Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Occorrerà allora fornire ai due nuclei una energia sufficiente per superare tale barriera e farli arrivare ad una distanza così piccola dove agiscono le forze nucleari in grado di superare la repulsione elettrostatica. La probabilità di superare tale barriera è, anche in questo caso, quantificata da una grandezza chiamata “*sezione d’urto (efficace) di fusione*” che è *funzione dell’energia posseduta dai nuclei interagenti. Più grande è tale grandezza, più elevata è la probabilità di interazione tra i due nuclei leggeri (cioè di fusione nucleare). Si può rendere elevata tale probabilità facendo sì che la velocità con cui i nuclei reagenti si urtano sia molto alta: cioè la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) deve essere molto elevata.*

### Alcune reazioni di fusione



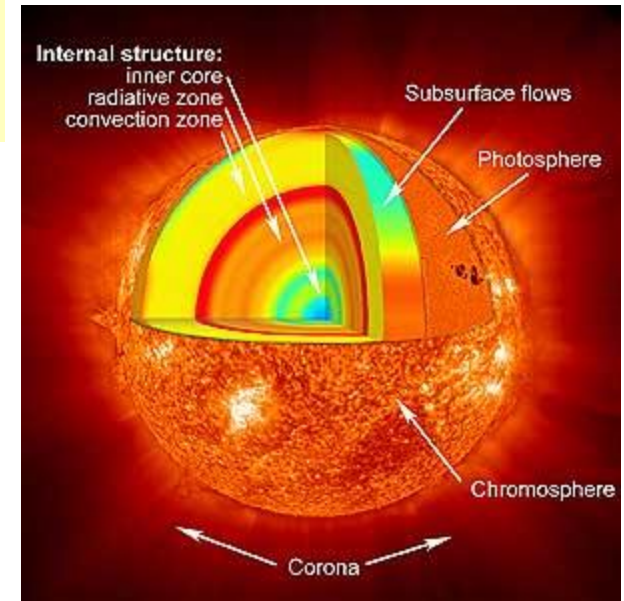
La **reazione tra Deuterio e Trizio** è quella che presenta valori più elevati di sezione d’urto anche per valori non estremamente alti di energia: essa è pertanto più facilmente realizzabile.

# Fusione nucleare: fornace solare

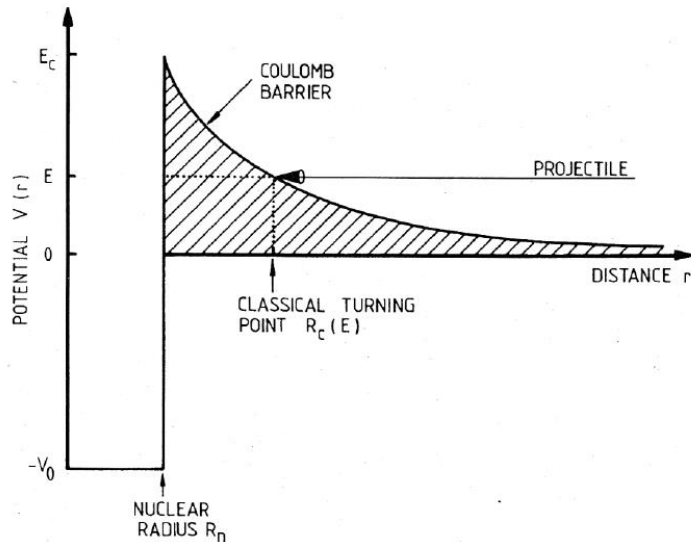


Reazione limitante:  
formazione del deutone  
4 miliardi di anni

Condizioni:  
Temperatura: 14 milioni di gradi  
Densità:  $150 \text{ g/cm}^3$



# La reazione pp



tunnelling  
through barrier  
 $\propto \exp(-2\pi\eta)$

$$= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\hbar v} \quad \left( \text{Sommerfeld parameter} \right)$$

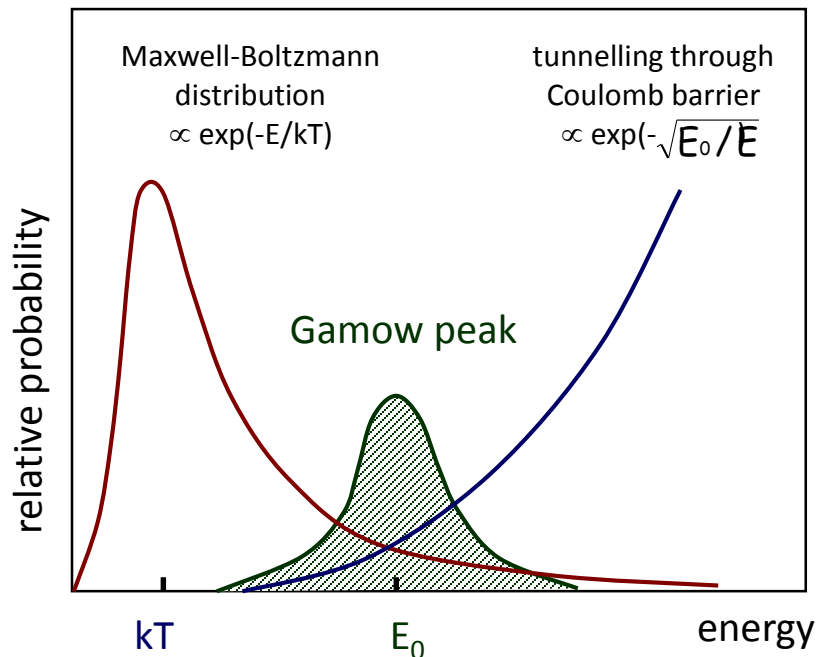
Modello a gas/plasma di ioni  
con energie che seguono  
una distribuzione di Gibbs

$$p(E) = \alpha e^{-\beta E} \quad \text{con} \quad \beta = \frac{1}{k_B T}$$

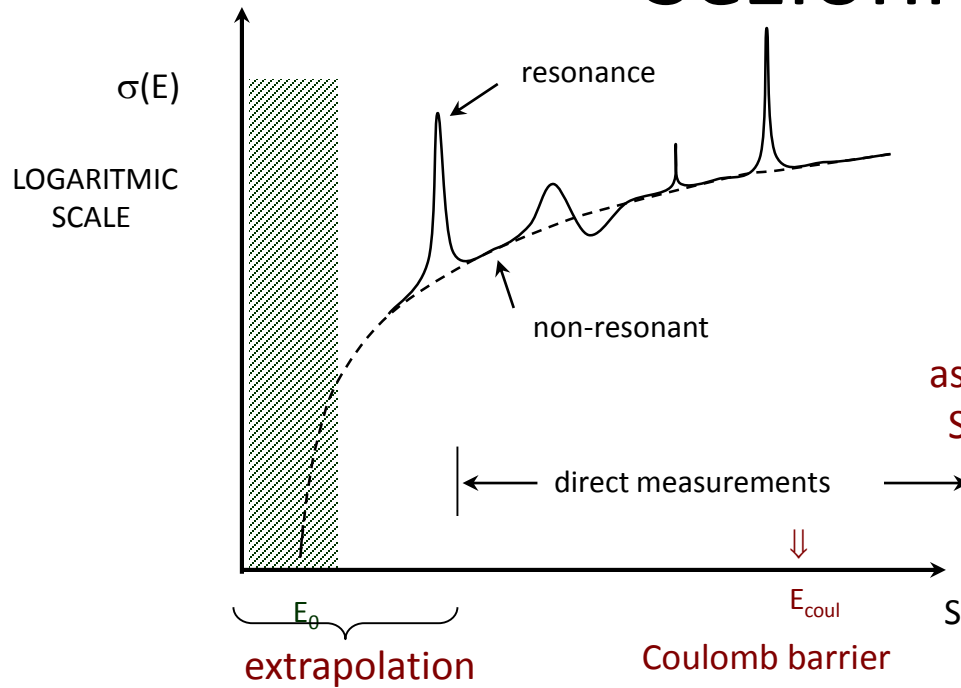
Gamow peak  $E_0 = f(Z_1, Z_2, T)$

Solo quando le energie dei reagenti  
sono in una certa regione si ha  
una significativa probabilità di fusione

Teoria esatta:  $P_{fus} = \langle \sigma v \rangle$



# Sezioni d'urto

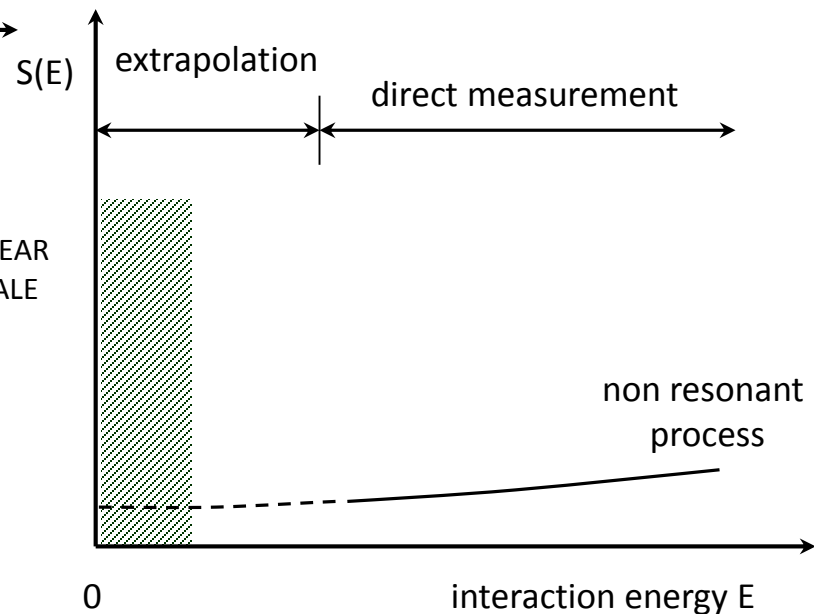
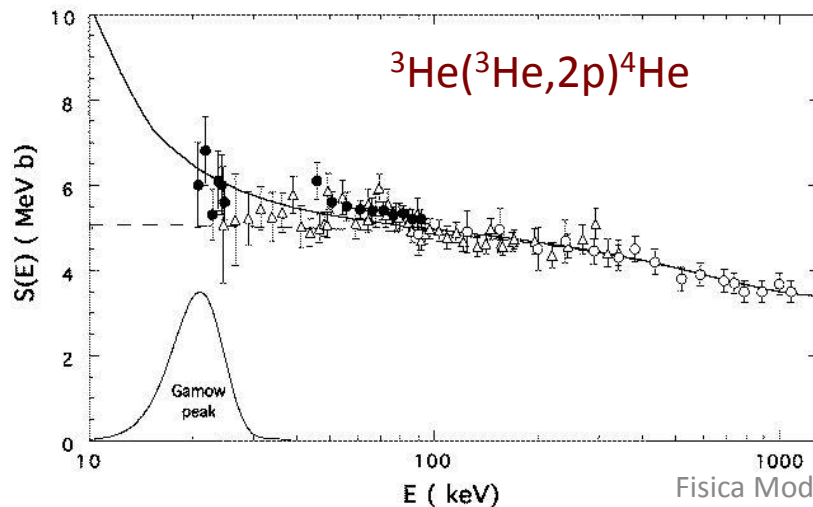


Transform:

$$\sigma(E) = S(E) \frac{1}{E} e^{-2\pi\eta} = S(E) \frac{1}{E} e^{-\alpha/\sqrt{E}}$$

astrophysical  
S(E)-factor

non-nuclear  
(for s-waves only!)





# Conversione di idrogeno in elio

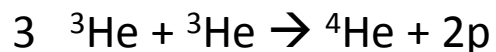
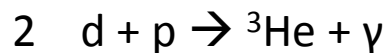
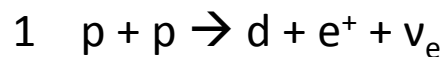
La fusione di 4 protoni per dare  $^4\text{He}$  in un unico passo è assolutamente trascurabile

- Le reazioni di fusione procedono in passi che coinvolgono solo due reagenti
- Quella che domina il tempo del ciclo è la prima: produzione di deuterio. Vita media di un protone nel nucleo del sole: 4 miliardi di anni!

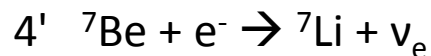
## The PP Chain: catena protone-protone

Per il Sole la catena PP è la principale fonte energetica. Ha tre diramazioni principali

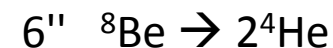
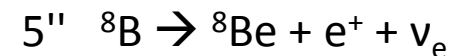
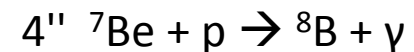
### PPI Chain



### PPII Chain



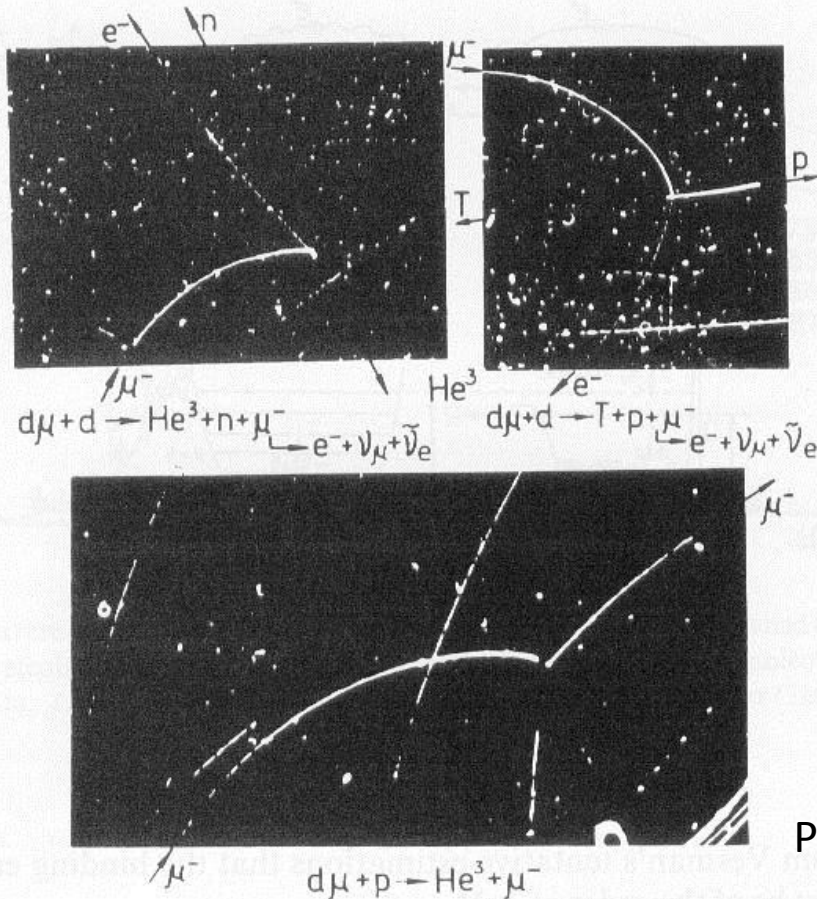
### PPIII Chain



**Temperature: 15,7 MK; Densità: 150 kg/dm<sup>3</sup>**

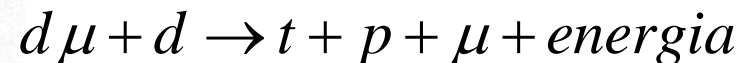
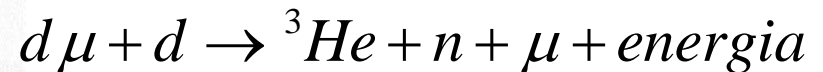
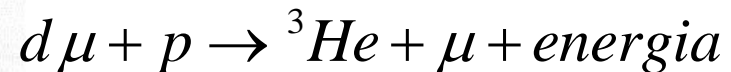
# Prima osservazione di fusione sulla Terra

1957: Alvarez ed altri studiano muoni in camera a bolle di idrogeno



## Muone:

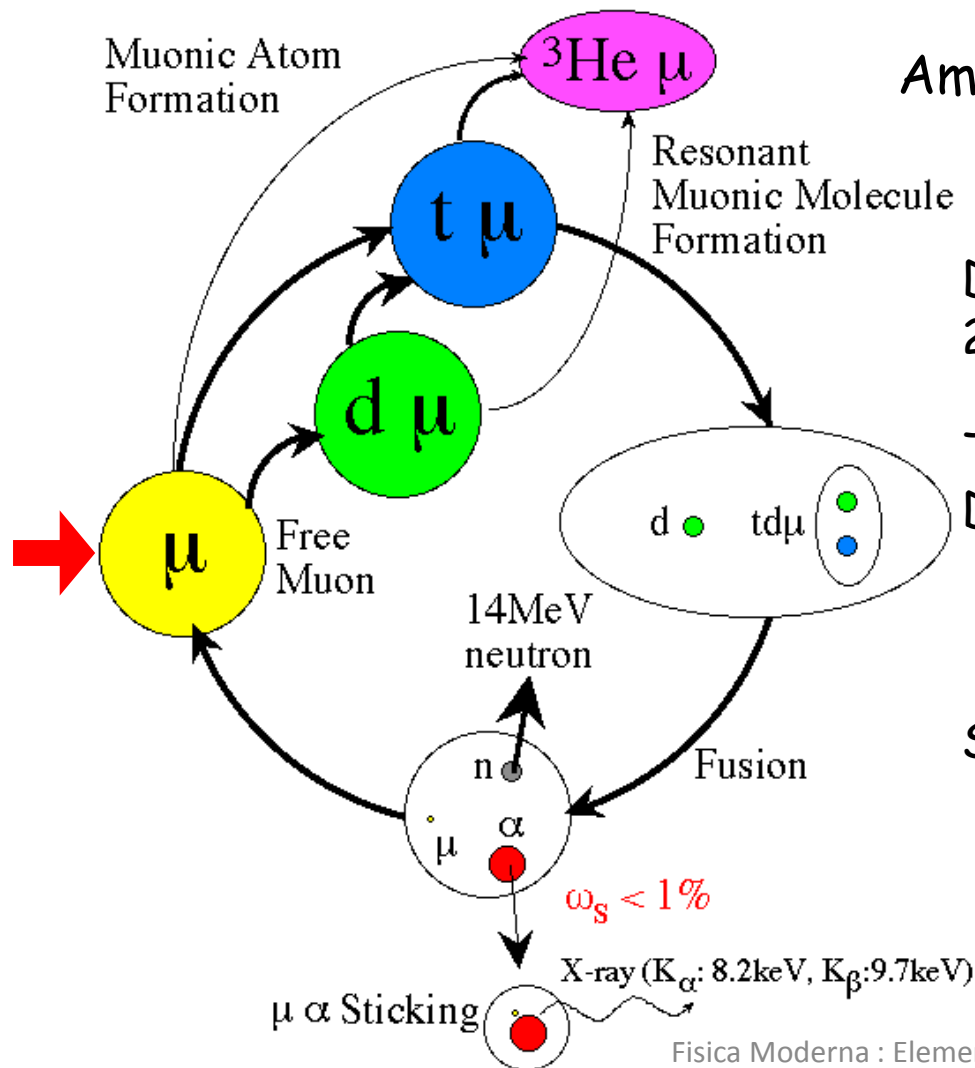
"parente" pesante dell'elettrone  
 massa:  $m_\mu = 207m_e$   
 vita media: 2.2 microsecondi  
 carica elettrica: negativa



Processi a temperatura dell'idrogeno liquido:

**"Fusione Nucleare Fredda"**

# Fusione catalizzata da muoni ( $\mu$ CF)



Ambiente: miscela di deuterio e trizio liquido ad alta densità

Dimensione atomo muonico:  
207 volte più piccolo dell'atomo di H

Tempi di formazione: ns  
Durata del ciclo: qualche ns

Sticking:  $< 1\%$

# Atomo muonico e molecole

Raggio di Bohr (H=pe)  $a_0 = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{me^2} = 0,0529 \text{ nm}$

Distanza protoni in  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ :

$$R \approx 0,13 \text{ nm} \approx 2,6a_0$$

Raggio di Bohr ( $d\mu$ )  $a_\mu = \frac{(4\pi\epsilon_0)\hbar^2}{m_\mu e^2} = a_0 / 207$

Distanza deutoni  $d\mu d$ :

$$R \approx 2,6a_\mu$$

- Probabilità di fusione  $dd$  e  $d\mu d$ :

Inferenza da atomo di idrogeno:

$$\psi_{1,0,0}(r, \vartheta, \varphi) = \sqrt{\frac{1}{\pi a_0^3}} e^{-\frac{r}{a_0}}$$

$$|\Psi_{dd}(0)|^2 \propto (a_0)^{-3}$$

$$|\Psi_{d\mu d}(0)|^2 \propto (a_\mu)^{-3} \approx 10^7 (a_0)^{-3}$$

# $\mu$ CF numeri principali

- Vita media muoni:  $\tau = 2.2 \mu\text{s}$  (o tasso di sparizione:  $\lambda_0 = 1/\tau$ )
- Frequenza del ciclo  $\lambda_c (\uparrow)$
- Probabilità di perdita del muone per ciclo  $W (\downarrow)$ 
  - Sticking: attaccamento all'elio ( $w \approx 0.5\%$ )
- Tasso di perdita di fusioni  $\lambda_n = \lambda_0 + W\lambda_c (\downarrow)$
- Numero di fusioni per muone:  
$$N = \lambda_c / \lambda_n = 1 / [(\lambda_0 / \lambda_c) + W] (\uparrow) \quad (N \approx 200)$$
- Costo di produzione dei muoni ( $\sim 5 \text{ GeV}$ ) ( $\downarrow$ )
  - vs fusion output (17.6 MeV)
  - Breakeven scientifico ( $N \approx 280$ ), tecnologico ( $N \approx 500$ )

# $\mu CF$

- Due fattori limitanti:

– Sticking troppo alto

$$\bullet W = 0.5\% \quad \rightarrow 0.1\%$$

– Alto costo dei muoni

$$C = 5 \text{ GeV} \quad \rightarrow 1 \text{ GeV}$$

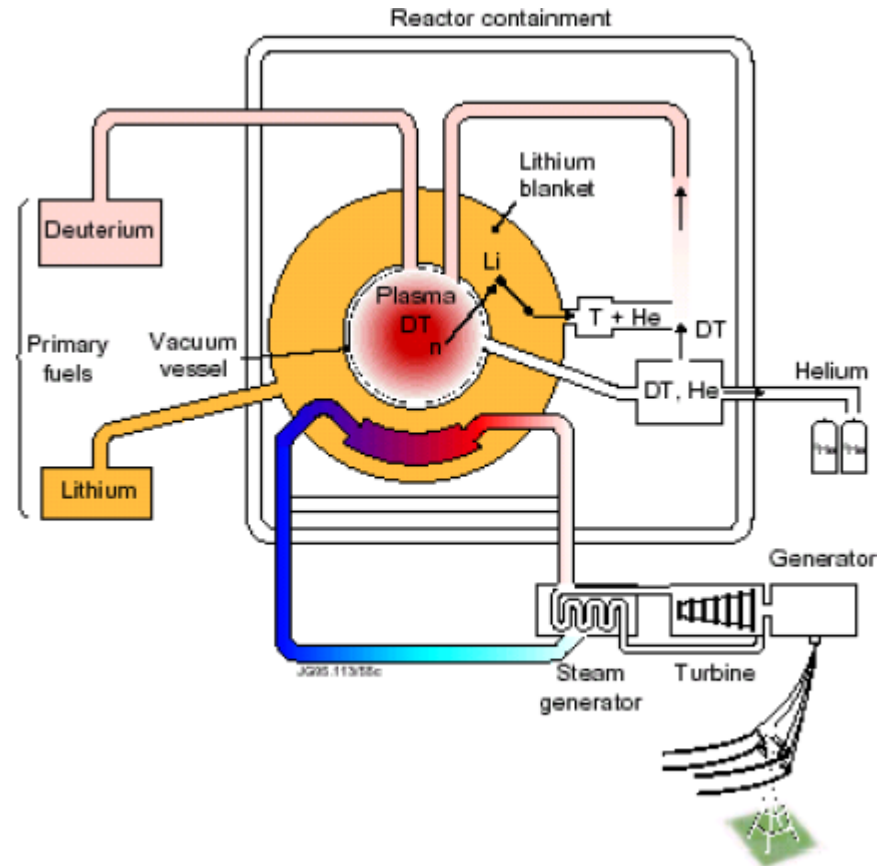
## Energia da fusione nucleare : i reattori nucleari a fusione

Lo schema tipico di un impianto nucleare a fusione per la produzione di energia (termica e successivamente elettrica) è rappresentato a lato.

Il plasma confinato a 100 milioni di gradi deve essere rifornito di combustibile (deuterio e trizio). I neutroni, non confinati, reagiscono con il mantello di litio che circonda la camera toroidale, dando origine a trizio che viene quindi estratto e riciclato per fornire plasma.

L'elio trasferisce la sua energia al plasma e sostiene i nuovi processi prima di essere pompato fuori dal toro insieme a parte del plasma per recuperare le particelle di D e T che non hanno reagito.

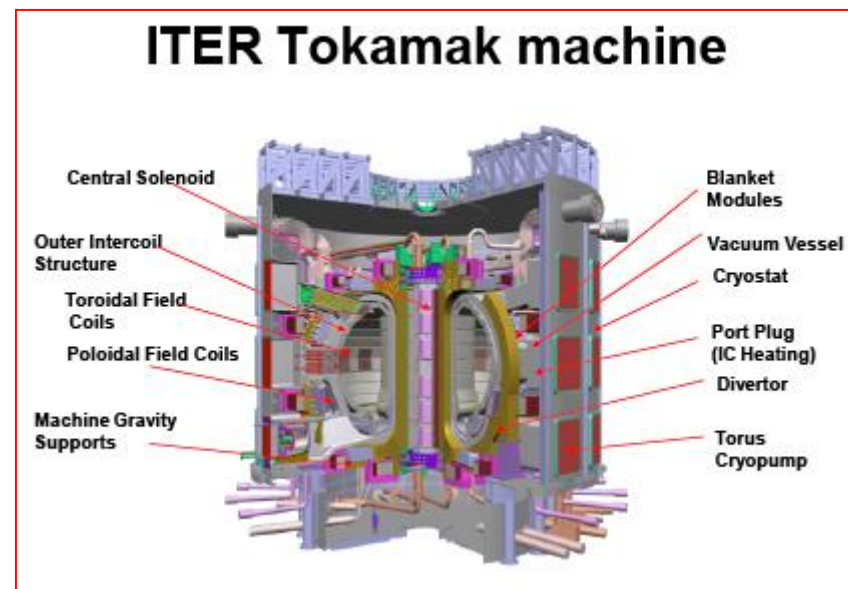
L'energia liberata dalle reazioni, in particolare quella trasportata dai neutroni, viene recuperata sotto forma di calore generato nel mantello e nella prima parete ed utilizzata per produrre vapore come in uno schema convenzionale di centrale elettrica .



## Il progetto ITER di reattore nucleare a fusione

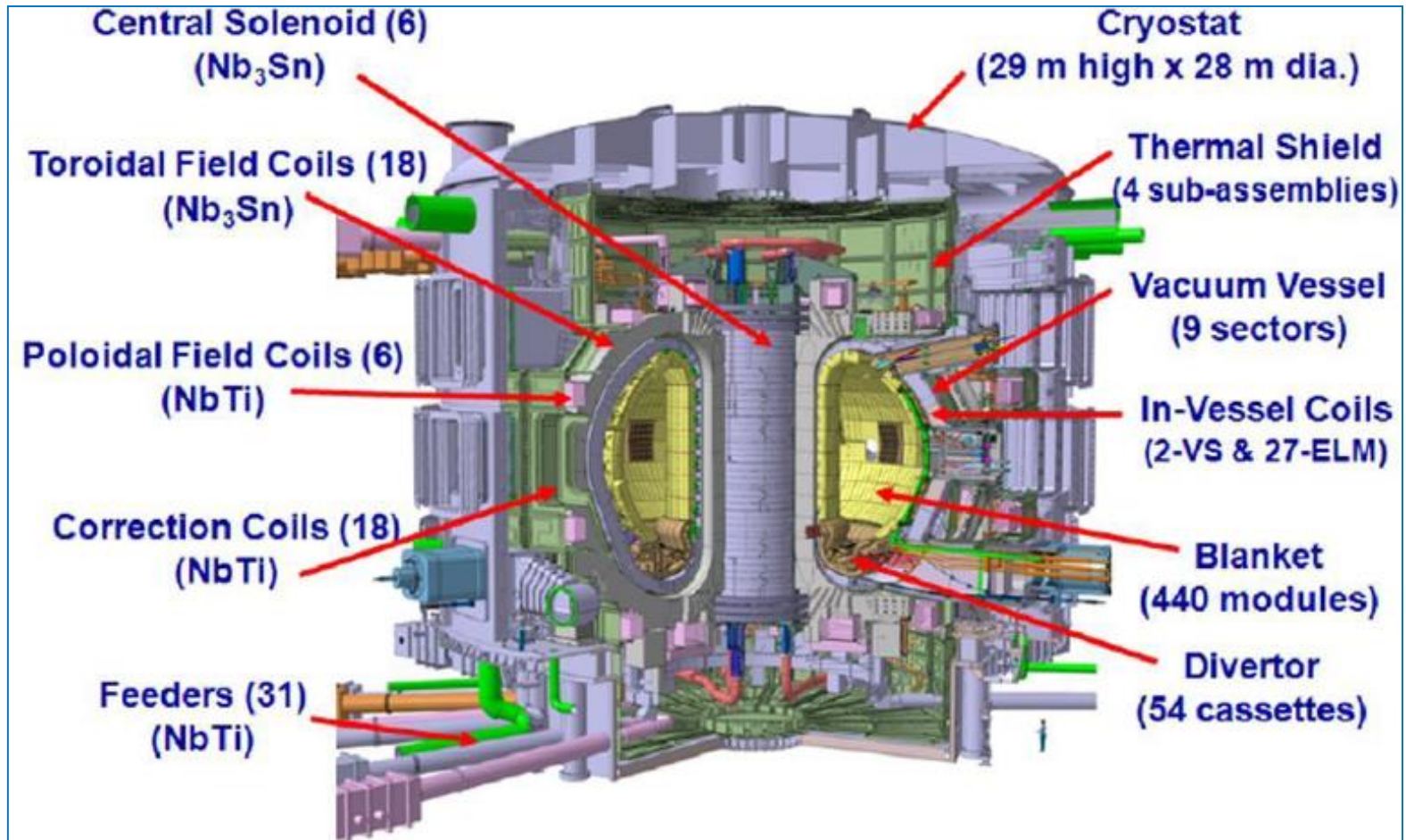
Per dimostrare la fattibilità tecnologica di un impianto nucleare a fusione e prima di dare il via alla costruzione di impianti prototipi pre-commerciali, si è costituita una impresa raggruppante sette grandi partners mondiali (Comunità Europea, USA, Russia, Giappone, Cina, India, Corea del Sud) al fine di costruire un impianto sperimentale a fusione di tipo tokamak, di taglia paragonabile a quella di un futuro impianto commerciale. Tale impianto, denominato ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), sarà costruito congiuntamente dai sette partners presso il centro nucleare francese di Cadarache (in Provenza, Francia).

Il progetto finale di ITER è stato completato nel 2008. La “piattaforma” dove sarà costruito l’impianto è stata predisposta nel 2009 e la fase di costruzione dell’impianto stesso è stata avviata nella primavera del 2010 . La costruzione e la messa in esercizio dell’impianto richiederanno 8÷10 anni. Il primo plasma di ITER è previsto per fine 2020. La vita utile dell’impianto è prevista di circa 30 anni. Il costo stimato per ITER (progettazione, costruzione ed esercizio per 20-30 anni) è di circa 10 miliardi di euro (costi 2008).





***Il design attuale dell'isola nucleare (tokamak) di ITER***





**Piattaforma  
per ITER  
Inizio 2010**



**Impianto ITER  
Fine 2018**